Массовая радио-библиотека

МРБ

И. П. Золотухин
А. А. Изюмов
М. М. Райзман

Цифровые Звуковые Магнитофоны

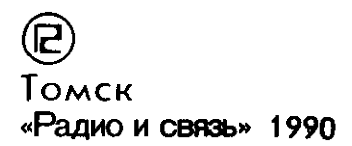
Издательство «Радио и связь»



Основана в 1947 году
Выпуск 1153

И. П. Золотухин
А. А. Изюмов
М. М. Райзман

Цифровые Звуковые Магнитофоны



Томск
«Радио и связь» 1990

ББК 32.871–5
З 79
УДК 681.84.083.8

Золотухин И.П. и др.

З 79 Цифровые звуковые магнитофоны/И.П.Золотухин, А.А.Изюмов, М.М.Райзман. – Томск: Радио и связь, Томский отдел, 1990. 160 с.: ил.– (Массовая радиобиблиотека. Вып. 1153).

Знакомит читателей с новым типом бытовой радиоэлектронной техники – цифровыми звуковыми магнитофонами с вращающимися головками. Приведены сведения о принципах работы, конструкции, технических и потребительских характеристиках. В доступной и сжатой форме описаны цифровые методы представления и обработки сигналов.

Для подготовленных радиолюбителей, может быть полезна специалистам по бытовой электронной технике, студентам вузов соответствующих специальностей.

З $\frac{2304000000-027}{046(01)-90}$ КБ–59–11–88 ББК 32.871–5

Рецензент: *доктор техн. наук, профессор Г.С.Шарыгин*

Научно-популярное издание

ЗОЛОТУХИН ИГОРЬ ПЕТРОВИЧ
ИЗЮМОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ
РАЙЗМАН МАРК МИХАЙЛОВИЧ

ЦИФРОВЫЕ ЗВУКОВЫЕ МАГНИТОФОНЫ

Руководитель отдела А.В.Соснин
Редактор Л.И.Казак
Технический редактор Т.Ф.Колчина
Корректор Н.Н.Матасова

ИБ № 2203

Подписано в печать 12.02.90 КЗ 06010 Формат бумаги 84x108/32
Бумага кн.журн. Гарнитура "Пресс-роман" Печать офсетная Усл.-печ.л. 8,4
Усл.кр.-отт. 8,506 Уч.-изд.л. 12,97 Тираж 200000 экз. Изд. № 027
Зак. № 47 Цена 95 к.

Томский редакционно-издательский отдел издательства "Радио и связь", 634055, Томск, проспект Академический, 1.

Отпечатано в 4-й типографии издательства "Наука". 630077, Новосибирск, Станиславского, 25

ISBN 5-256-00559-6

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современная бытовая радиоэлектронная аппаратура (БРЭА), без преувеличения, преобразила жизнь людей. Вслед за радиоприёмниками, магнитофонами, телевизорами, стереосистемами в быт входят видеомагнитофоны и видеокамеры, компакт-дисковые проигрыватели, домашние компьютеры, радиотелефоны и многое другое. Постоянный напряженный поиск ученых и инженеров позволяет готовить производство все новых, еще более совершенных изделий БРЭА.

Объемы, число фирм, занятых производством БРЭА, в странах мира постоянно растут. Идут процессы специализации, национальной и межнациональной кооперации, развивается международное научно-техническое сотрудничество. Вместе с тем, как в любой другой области, нарастают тенденции соперничества, конкуренции, борьбы за новые рынки. Успех приходит тогда, когда наиболее полно учитывается вся совокупность новых возможностей, правильно определяются запросы и нужды потребителя, обеспечиваются высокие параметры аппаратуры, качество и приемлемые цены. В бытовой электронике нет сегодня незыблемых авторитетов, нет систем и моделей, которые могли бы обеспечить безоблачные горизонты их производства и сбыта на много лет вперед.

И все же сейчас в этой области четко обозначились и интенсивно развиваются несколько основополагающих тенденций, без понимания и учета которых трудно определить перспективные пути исследований, разработок и производства БРЭА, правильно планировать подготовку инженерных кадров, не ошибиться в выборе направлений инвестиций. К таким тенденциям, в первую очередь, следует отнести неуклонное движение к интеграции устройств для приема, обработки, хранения и воспроизведения звуковой и изобразительной информации.

На этом пути уже пройденными оказались этапы создания радиолы, магнитолы, стереокомплексов, магниторадиол, магнитол со встроенными телевизорами, видеокамер со встроенными видеомагнитофонами (камкордеров), носимых телевизоров с видеомагнитофонами, систем, объединяющих компакт-дисковые проигрыватели с магнитофонами и телевизионными мониторами, и многое другое. На очереди создание аудиовидеотехники, удовлетворяющей в едином комплексе все информационно-развлекательные потребности человека.

Другой тенденцией, тесно связанной с предыдущей, следует считать все более широкое и разнообразное использование в бытовой электронной аппаратуре элементов вычислительной техники и автоматики, микропроцессорных устройств, встроенных ЭВМ и персональных (домашних, семейных) компьютеров, позволяющих дополнить прием, запись и воспроизведение аудиовидеоинформации.

Третья тенденция, во многом являющаяся технической основой для первых двух, - это переход от аналоговых методов представления и обработки сигналов к цифровым. Эта тенденция является общей для всей радиоэлектронной техники и базируется на фундаментальных принципах информатики. Бытовая радиоэлектроника подошла к возможностям перехода на цифровые системы лишь в последние годы. Это объясняется тем, что создание изделий очень высокой сложности на основе дешевых больших и сверхбольших интегральных схем с приемлемой ценой может быть достигнуто на базе революционных достижений микроэлектроники. Но однажды, преодолев этот барьер стоимости, потребительская электроника открыла для себя практически неограниченные возможности для создания систем с характеристиками, еще недавно казавшимися фантастическими.

Вслед за широким выходом на рынок лазерных цифровых компакт-дисковых систем началась интенсивная работа по созданию цифрового радиовещания, цифрового телевидения, цифровых звуковых и видеомагнитофонов. Работа ведётся в разных странах и особенно в Японии столь энергично, что систематическое освещение основных ее аспектов в журнальных публикациях, специальных и популярных изданиях зачастую отстает от запросов специалистов и любителей. Особенно остро ощущается отсутствие вводных книг и брошюр, позволяющих получить общее представление о предмете.

Авторы этой книги поставили перед собой скромную задачу систематизации имеющейся информации только об одном из видов нового поколения бытовой радиоэлектроники — о цифровом звуковом магнитофоне с вращающимися головками. Появившись на рынке Японии в 1987 году, этот вид БРЭА привлек к себе большое внимание специалистов и любителей. Вне зависимости от того, получит ли новый тип магнитофона широкое распространение в мире и в нашей стране, сумеет ли в острой конкурентной борьбе эта система устоять и развиваться, уже полученные при ее создании, производстве и первых годах эксплуатации научно-технические, конструктивно-технологические, потребительские и коммерческие характеристики заслуживают самого пристального изучения. Сосредоточив в себе большое число новейших решений, находящихся во многом на пределе технических и технологических возможностей в различных областях техники, новый тип аппарата, без сомнения, интересен широкому кругу специалистов.

Книга, кроме общетехнической информации, содержит описание принципов построения и работы нового типа магнитофонов, сведения о

схемах, конструкции и характеристиках первого поколения зарубежных моделей и их составных частей. Эти сведения, а также общие оценки перспектив и сравнительные прогнозы на будущее базируются, в основном, на зарубежных публикациях, рекламных и фирменных сообщениях.

Различные точки зрения на место цифровых магнитофонов в новом поколении бытовой радиоэлектроники позволяют авторам самим фактом выхода этой книги высказать и свою позицию, состоящую в том, что в нашей стране это направление новейшей техники должно развиваться наряду с другими перспективными направлениями цифровой БРЭА. Уже начавшиеся работы по созданию отечественных цифровых магнитофонов, наряду со всесторонним изучением и использованием зарубежного опыта , базируются на большом научном, техническим и технологическом потенциале, накопленном в нашей стране. Эти работы предполагают объединение усилий специалистов различных отраслей и можно надеяться, что в скором времени появятся публикации, отражающие результаты этих объединенных усилий.

Предлагаемая вниманию читателей книга может быть полезной подготовленным радиолюбителям, специалистам, связанным с проблемой перехода к цифровым методам в БРЭА, студентам радиотехнических и смежных специальностей, специализирующихся по БРЭА.

Авторы заранее благодарят читателей за замечания, критику и дискуссии. Отзывы о книге просим направлять по адресу: 634055, Томск, пр. Академический, 1, Томский РИО издательства "Радио и связь".

РАЗВИТИЕ ТЕХНИКИ ЗАПИСИ ЗВУКА

Цифровые системы записи звука, о которых речь пойдет в книге, появились в результате дальнейшего развития традиционных хорошо известных систем звукозаписи на грампластинки и магнитную ленту. В этом разделе кратко рассматриваются основные этапы развития традиционных систем звукозаписи и предпосылки, которые сделали возможным и необходимым переход к цифровым методам.

Обращение к общеизвестным сведениям продиктовано заботой о тех, кто только начинает интересоваться данной проблемой. Подготовленные радиолюбители и специалисты могут при чтении опустить этот и следующий вводные разделы.

МЕХАНИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ

Мысль о сохранении, консервации звуковых образов возникла очень давно. Но только в конце 1877 года Т. Эдисоном был продемонстрирован первый действующий аппарат для записи и воспроизведения звука – фонограф. Запись производилась на оловянной фольге, покрывающей поверхность цилиндра-валика. Специальная игла, связанная с мембраной, при записи формировала в фольге спиральную дорожку, глубина которой соответствовала громкости звука. Звуковые колебания, воздействующие через мембрану на иглу, усиливались предварительно с помощью рупора. При воспроизведении та же игла двигалась по канавке, углубления которой преобразовывались с помощью мембраны и рупора в звуковые колебания. В первых фонографах валик приводился в движение с помощью рукоятки. Недостатки данных аппаратов очевидны: нестабильность частоты вращения валика приводила к искажению звука; запись на оловянной фольге при повторных воспроизведениях быстро изнашивалась и т.д. Но основным препятствием для широкого распространения фонографов была сложность изготовления копий фонограмм. Работы над совершенствованием фонографа, тем не менее,

продолжались вплоть до двадцатых годов нашего столетия, пока он не был вытеснен более современным аппаратом мехнической записи – граммофоном, появившемся на десять лет позже фонографа. Изобретателем граммофона стал американец Э.Берлинер, но сама идея записи на диске и изготовления затем матрицы и копий была высказана еще в 1877 году французским изобретателем Ш.Кро. В первых образцах запись звука велась на диске, покрытом сажей, причем колебания иглы совершались не в вертикальном, как в фонографе, а в поперечном направлении. Затем извилистая звуковая дорожка, расположенная на диске по спирали, закреплялась лаком, после чего можно было изготовлять матрицу и копии – грампластинки. Как и в фонографе, преобразование механических колебаний иглы в акустические волны проводилось с помощью связанной с иглой мембраной и рупора. Это изобретение позволило наладить массовое производство грампластинок и граммофонов. Система записи также была чисто механической, со всеми присущими ей недостатками. Чтобы получить достаточную громкость звука, звуковая дорожка на пластинке должна обеспечить большую амплитуду колебаний иглы, а это вело к увеличению площади, занимаемой одной дорожкой на пластинке. Поэтому длительность звучания одной стороны граммофонной пластинки диаметром 30 см ("гигантов" – как мы их сейчас называем) не превышала 4–5 минут.

С 1925 года начинается электронная эра звукозаписи. Пластинки стали записываться в студиях с помощью электронного рекордера. С появлением ламповых усилителей граммофон потерял рупор и стал намного ближе к современному проигрывателю пластинок. Частота вращения диска, приводимого в движение электродвигателем, составляла 78 об/мин, радиус кривизны конца иглы звукоснимателя равнялся 63,5 мкм. Грампластинки изготовлялись из щеллачной массы. Хотя качество звучания электронного проигрывателя по сравнению с граммофоном резко повысилось, время воспроизведения осталось тем же (для одной стороны пластинки).

В 1948 году в США была разработана долгоиграющая пластинка. Так как громкость звука определялась теперь мощностью усилителя и громкоговорителя, то отпала необходимость в большой амплитуде колебаний иглы. Стало возможным уменьшить площадь, занимаемую дорожкой записи на пластинке. Для производства долгоиграющих пластинок стал использоваться новый материал – хлорвинил, позволяющий формировать узкую дорожку записи с требуемой точностью. Радиус закругления иглы стал 25,4 мкм. Время воспроизведения одной стороны пластинки диаметром 30 см увеличилось до 20–30 минут при снижении скорости вращения до 33 1/3 об/мин.

В 1957 году был разработан стандарт на стереофоническую запись "45x45". Сигналы двух звуковых каналов по этому стандарту записываются на боковых стенках звуковой канавки пластинки под углом 45°. Такие пластинки сейчас есть почти в каждой семье. Плотность записи

на стереофонической пластинке повысилась вдвое по сравнению с первыми монофоническими долгоиграющими дисками.

Чем определяется плотность записи на единицу поверхности для грампластинки и что это такое?

Можно сказать, плотность записи – это показатель, определяющий, насколько "быстрые" изгибы звуковой дорожки можно записать и воспроизвести с грампластинки. Рассмотрим процесс записи диска-оригинала. Звуковые колебания, преобразованные с помощью микрофона в электрический сигнал и усиленные электронным устройством, воздействуют через электромеханический преобразователь на алмазный резец рекордера, вырезающего канавку на поверхности диска. Ясно, что звуковому сигналу с самой большой частотой соответствует наиболее извилистая дорожка, оставляемая резцом на поверхности диска. При этом, если диск вращается быстро, изгибы дорожки будут более плавными, чем при вращении с меньшей скоростью.

Итак, можно сделать вывод, что носитель записи (в данном случае – грампластинка) с большей плотностью записи на единицу поверхности по сравнению с носителем с меньшей плотностью записи позволяет записать и воспроизвести звуковую программу большей продолжительности и (или) с лучшим качеством за счет расширения частотного диапазона.

Первые граммофоны и патефоны имели узкий частотный диапазон воспроизведения – от 200–300 Гц до 3–4 кГц. Этого было достаточно для "опознания" голоса певца, но об естественности звучания говорить не приходилось. Жесткая игла, связанная с мембраной, требовала сглаженной звуковой канавки, так как не могла следовать за ее резкими изгибами. Увеличение же частоты вращения диска для расширения частотного диапазона привело бы к недопустимому сокращению времени звучания. Появление более совершенных звукоснимателей с большой гибкостью подвеса иглы и малой прижимной силой позволило обеспечить надежное следование иглы по звуковой дорожке современной грампластинки. При скорости вращения 33 1/3 об/мин долгоиграющая пластинка обеспечивает воспроизводимый диапазон частот от 30 Гц до 20 кГц.

Итак, каковы же основные тенденции развития звукозаписи применительно к грампластинкам? Во-первых, основным является стремление к повышению качества, максимальное приближение воспроизводимого звука к естественному звучанию. Во-вторых, снижение расхода носителя записи равнозначно увеличению времени звучания программы при одинаковом диаметре дисков. При объединении этих двух требований становится ясно, что для их удовлетворения необходимо увеличить плотность записи на единицу поверхности носителя. Развитие грамзаписи показывает, что тенденция увеличения плотности записи неуклонно соблюдается при переходе к каждому следующему этапу ее развития.

Важными являются также требования снижения износа носителя и иглы, уменьшения искажения звука за счет неравномерности вращения диска (детонации), деформации пластинки и неидеальности следования иглы по канавке, повышения устойчивости к запыленности и загрязнению носителя, удобства и простоты эксплуатации системы. Чтобы вновь созданная система звукозаписи оказалась жизнеспособной, она должна обеспечить существенное улучшение, по крайней мере, нескольких из перечисленных параметров и, прежде всего, качества звучания. Появление каждой новой системы связано с необходимостью замены у потребителя всего парка старых устройств. Чтобы потребитель стал покупать новую систему звукозаписи, ее показатели качества, отнесенные к цене, должны быть существенно выше, чем у старой системы.

Долгоиграющая пластинка по сравнению с граммофонной обеспечила лучшее по качеству и значительно более длительное воспроизведение, что обеспечило вытеснение старых проигрывателей с частотой вращения 78 об/мин. Появление стереофонической пластинки заставило потребителя приобретать новые разработанные для этого электронные системы. Однако, такие проблемы, как износ пластинки и иглы, детонация, необходимость бережного обращения с пластинкой все же остались.

Разработка новых, более совершенных звукоснимателей и материалов позволяет перейти к более низкой скорости вращения диска — 16 об/мин, что увеличивает вдвое время звучания. Но при этом качество звуковоспроизведения остается на прежнем уровне. Попытка широкого внедрения новой пластинки, предпринятая рядом фирм, не увенчалась успехом. Потребитель не увидел существенных преимуществ новой пластинки. Дальнейшее улучшение качества звуковоспроизведения, осуществляемое с помощью привычных, так называемых аналоговых методов обработки сигнала, влечет за собой значительное увеличение затрат. Вероятно, можно сделать на этих методах систему звукозаписи, звучание которой не будет отличаться от "живого" звука, но при этом цена такой системы будет совершенно невероятной. Чтобы снять эти противоречия, понадобился качественно иной подход к проблеме записи-воспроизведения в целом. Таким новым этапом стал переход к цифровым методам записи и воспроизведения звука.

В 1977 году фирмами Philips и Sony была начата разработка цифровой пластинки комакт-диска (CD). В 1979 году фирмой Philips были сформулированы общие технические требования для цифровой системы записи на диск, которые легли в основу принятого в 1982 году международного стандарта на систему.

В системе "Компакт-диск" запись звуковых сигналов, преобразованных в цифровую форму, осуществляется с помощью микроскопических углублений (пит), наносимых на поверхность компакт-диска по спиральной дорожке при тиражировании. Считывание сигнала при воспроизведении осуществляется при помощи отраженного от поверхности диска лазерного луча, интенсивность которого меняется в зави-

симости от наличия или отсутствия пит на освещаемой части дорожки. Далее отраженный луч преобразуется с помощью фотодиода в электрический сигнал, который поступает в формирователь цифрового сигнала, а также используется для управления положением оптомеханической считывающей головки и частотой вращения диска. Цифровой сигнал подвергается специальной обработке, после чего преобразуется в аналоговую форму и поступает на вход проигрывателя компакт-диска.

. По сравнению с грампластинкой компакт-диск имеет значительные преимущества по всем показателям. Применение цифровых методов обработки сигнала обеспечило практически не искаженное звуковоспроизведение. Уровень искажений, вносимых при преобразовании звукового сигнала из цифровой формы в аналоговую, оказывается ниже порога слышимости человеческого слуха. Запыленность, царапины на компакт-диске практически не влияют на качество воспроизведения. Имея диаметр всего 120 мм (по сравнению с 30-сантиметровым гигантом компакт-диск кажется карликом), он обеспечивает 74 минуты звучания. Благодаря бесконтактному (с помощью луча лазера) воспроизведению, отсутствует проблема износа носителя. Детонация звука полностью устраняется использованием цифровых методов обработки звукового сигнала. Так как кроме звуковой программы на диске записана также дополнительная информация о времени звучания фрагментов, порядковых номерах фрагментов и т.п., становится возможным выбор и воспроизведение в любой последовательности отдельных фрагментов программы. Компакт-диск не требует столь бережного обращения, как грампластинка.

Все эти преимущества обеспечили прочное завоевание рынка новой системой звукозаписи. По прогнозам в развитых странах переход от грампластинки к компакт-диску произойдет не позднее 1990 года. Япония уже с 1989 года отказывается от выпуска обычных грампластинок.

Компакт-диск – новый этап в развитии техники звукозаписи. Шаг дорожек в диске равен 1,6 мкм, скорость вращения диска в зависимости от положения считывающей лазерной головки – от 200 до 500 оборотов в минуту. Так как звуковой сигнал, преобразованный в цифровую форму, занимает полосу частот до 3–4 МГц, что более чем в 100 раз превышает полосу частот грамзаписи, плотность записи на компакт-диске возрастает по сравнению с грамзаписью на несколько порядков. При этом запись осуществляется только на одной стороне диска. Масса диска – не более 1/6 от массы грампластинки. Но тем не менее, у компакт-диска, как и у грампластинки есть один существенный недостаток – нельзя переписать программу. Понравившуюся песню любитель музыки может купить только с новым диском. Однако ряд зарубежных фирм ведут поиск путей создания так называемого "обратимого" диска, позволяющего устранить этот принципиальный недостаток. Возможность выборочной записи программ в настоящее время имеют только системы магнитной звукозаписи.

МАГНИТНАЯ ЗВУКОЗАПИСЬ

Магнитная звукозапись была изобретена В.Паульсеном в 1898 году. При этом звуковые сигналы записывались на проволоку. В качестве магнитного носителя проволока имела следующие недостатки: она размагничивалась; присутствовало влияние соседних витков друг на друга (так называемый копир-эффект); зачастую скручивалась. В тридцатые годы была решена проблема записи на магнитную ленту. Сначала магнитный слой наносился на бумажную основу, затем она была заменена на пластмассовую. В сороковые годы запись на ленту была значительно усовершенствована, усиленно развивалась технология, и в конце периода первые магнитофоны появились на потребительском рынке. С рождением компьютеров в пятидесятых годах магнитофоны стали также выполнять роль внешних запоминающих устройств. Вслед за изобретением в конце пятидесятых годов вращающейся магнитной головки последовало развитие и производство видеомагнитофонов.

Развитие магнитной записи имеет очевидное сходство с развитием механической записи. С одной стороны, вся история магнитной записи представляет собой непрерывную гонку за возможно более широким диапазоном частот записи или большей частотой записи компьютерных данных в единицу времени, с другой стороны, – неизменное стремление уменьшить расход носителя (магнитной ленты) за счет увеличения плотности записи на единицу его поверхности. Только в случае магнитной записи звуковой сигнал преобразуется не в изгибы дорожки, а в "картинку" распределения намагниченности поверхности магнитной ленты. При этом записываемому сигналу с самой высокой частотой соответствует наименьший размер участка намагниченности ленты. Размер или длина этого участка, а значит, и плотность записи зависят от скорости движения ленты относительно головки записи.

Появление новых материалов для магнитных головок, улучшение свойств носителя способствовали развитию высокоплотной магнитной записи. Первые студийные магнитофоны работали при скорости движения ленты 76,2 см/с. Затем стали появляться магнитофоны со скоростью 38,1 и 19,05 см/с. Последнее значение скорости и сейчас сохраняется в бытовых катушечных магнитофонах наряду со скоростью 9,5 см/с. Переворот в технике магнитной звукозаписи произвело появление кассетных магнитофонов со скоростью движения ленты 4,75 см/с, имеющих малые габаритные размеры и питание от батарей. Данные магнитофоны впервые разработаны в середине шестидесятых годов фирмой Philips и имеют компакт-кассету с магнитной лентой шириной 3,81 мм. Рядом фирм уже после появления компакт-кассет были предложены другие типы кассет. Хотя многие из них имели лучшие характеристики, они не получили распространения, так как потребитель не увидел существенных преимуществ предлагаемых систем по сравнению с компакт-кассетой. Исключением может считаться заметное распрост-

ранение микрокассеты. Однако, наряду с миниатюризацией аппаратуры, она во всем остальном существенно уступает компакт-кассете, которой исполнилось четверть века, и в течение всего этого времени она непрерывно улучшается. Высококачественные кассетные деки, используя новые типы лент, способны конкурировать по качеству звучания с катушечными магнитофонами, имеющими скорость движения ленты 19,05 см/с.

Однако возможности улучшения качества записи ограничиваются свойствами канала прямой записи-воспроизведения (пары головка-лента). Как и в случае механической аналоговой записи, дальнейшее улучшение параметров сопровождается непропорционально большими затратами, ведущими к резкому повышению цен на аппараты. Все это говорит о том, что мы находимся на таком этапе, когда нельзя добиться существенного улучшения качества записи с одновременным уменьшением расхода магнитной ленты, используя традиционные методы аналоговой магнитной звукозаписи. Именно эта причина побудила перейти к цифровой записи звука на магнитной ленте.

История магнитной цифровой звукозаписи началась с 1965 года, когда японской радиовещательной корпорацией NHK были начаты исследования, а в 1967 году проведены опыты по цифровой звукозаписи. В качестве магнитофона использовался модифицированный видеомагнитофон, имеющий две вращающиеся магнитные головки и работающий на ленте шириной 25,4 мм. Звуковой сигнал, представленный в цифровой форме, записывался в полосе частот видеозаписи. Частота дискретизации составляла 40 кГц с 12-разрядным нелинейным квантованием. Работы получили высокую оценку и было признано целесообразным продолжать исследования в этом направлении.

В 1970 году началось укоренное внедрение цифровой магнитной звукозаписи в студиях. В основном это были модифицированные видеомагнитофоны формата U-matic с лентой шириной 19 мм. В том же году в ряде стран начата разработка цифровых магнитофонов с неподвижными головками, обладающих повышенной надежностью по сравнению с видеомагнитофонами благодаря низкой скорости движения ленты относительно головки. Для записи применялись блоки головок, одновременно записывающие до 32 дорожек.В 1972–1977 годах был разработан целый ряд таких магнитофонов. Все они были несовместимы друг с другом. Применялись блоки головок, имеющие от 9 до 32 дорожек, различные типы лент шириной 6,3; 12,7; 25,4 мм. Частоты дискретизации выбирались также самыми различными: 32; 35,7; 48; 50; 52 кГц. В различных моделях использовалось (12÷14)-разрядное квантование.

В 1975 году фирмой Sony начаты работы по исследованию возможности цифровой записи звука на бытовой видеомагнитофон, использующий кассету с лентой шириной 12,7 мм. Фирма пошла по пути создания приставки к видеомагнитофону, преобразующей звуковой сигнал в цифровой, а затем – в псевдотелевизионный, что позволило на

любой видеомагнитофон записывать вместо видеопрограммы высококачественную звуковую программу. В 1977 году такая приставка, получившая название ИКМ-процессора, поступила в продажу. Через год был выпущен ИКМ-процессор, предназначенный для профессионального использования и применяющийся совместно с видеомагнитофонами формата U-matic. А в 1979 году был принят стандарт "Кодирование – декодирование с использованием импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) в бытовой технике", что определило взаимозаменяемость записей, сделанных с помощью различных ИКМ-процессоров и бытовых видеомагнитофонов. Вскоре фирмой Sony был разработан комплекс БИС, и выпущена на рынок новая приставка, стоимость которой снизилась в 3 раза по сравнению с первым ИКМ-процессором. Уже в этой комбинации ИКМ-процессора и видеомагнитофона достигался расход ленты меньший, чем у высококачественного аналогового магнитофона, работающего на скорости 38,1 см/с. При этом качество записи было несравненно выше качества записи любого аналогового магнитофона.

Комбинация из ИКМ-процессора и видеомагнитофона получила широкое распространение в профессиональной и полупрофессиональной сфере. Комплекс цифровой звукозаписи стал впервые доступен и рядовому покупателю, хотя стоимость его не стала низкой (около 1000 долларов). И все же широкого распространения системы не получили. С одной стороны, высокая стоимость, с другой – большой расход дорогостоящей видеоленты для звукозаписи. Потребитель предпочитает просматривать с помощью своего видеомагнитофона видеопрограммы, а не слушать музыку, пусть и высокого качества. Кроме того, большая кассета формата VHS позволяет создавать только стационарные, но не портативные магнитофоны, имеющие наибольшую популярность. Возникла необходимость создания такой системы цифровой магнитной записи, которая обеспечивала бы существенный скачок в уменьшении расхода ленты, а значит, и размеров кассеты при реализации в полной мере всех преимуществ, какие дает цифровая звукозапись.

В июне 1983 года состоялась конференция по системам цифровой магнитной записи бытового применения. Непременным условием при создании новой системы ставилось значительное уменьшение расхода ленты и размеров кассеты по сравнению с компакт-кассетой. В работе конференции приняли участие 81 фирма, в том числе 60 японских. Для выработки требований к системе были созданы две рабочие группы, *задачей которых была разработка этих требований к цифровым маг*нитофонам со стационарной (S-DAT) и с вращающимися (R-DAT) головками.*).

*) S-DAT – Stationary head Digital Audio Tape;
R-DAT – Rotary head Digital Audio Tape.

После двух лет работы эта группа закончила формирование технических требований к S-DAT и R-DAT. Для выработки проекта международного стандарта в сентябре 1985 года был сформирован исследовательский комитет DAT.

В начале 1987 года почти все крупные японские фирмы начали продажу цифровых звуковых магнитофонов с вращающимися головками (R-DAT), а в конце 1987 года был принят международный стандарт на этот формат. Успех формата R-DAT объясняется, с одной стороны, более высокой плотностью записи на единицу поверхности по сравнению с S-DAT. Кассета R-DAT при меньших, чем у кассеты S-DAT, размерах обеспечивает двухчасовое воспроизведение по сравнению с полутора часами у S-DAT. Качество же звучания обоих магнитофонов идентичное и несравненно превосходит качество звучания любого аналогового магнитофона. Частотный диапазон воспроизведения–от 5 Гц до 22 кГц, коэффициент нелинейных искажений – менее 0,005%, отношение сигнал-шум – не менее 92 дБ, детонация – ниже пределов измерения. С другой стороны, производство R-DAT-магнитофонов, лентопротяжный механизм (ЛПМ) которого имеет большое сходство с ЛПМ видеомагнитофонов формата Video-8, базируется на важных достижениях в технологии их производства. Стандарт Video-8 был утвержден как международный в 1985 году. Распространение S-DAT по прогнозам будет ограничено профессиональной сферой, потому что существуют определенные технологические трудности изготовления миниатюрных многодорожечных блоков головок для них.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЗАПИСИ ЗВУКА

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

Прежде чем перейти к изложению специфических для аналоговой и цифровой звукопередачи вопросов, напомним некоторые основные термины и определения.

Диапазон колебаний звуковых частот, воспринимаемых человеческим ухом, лежит в интервале от 16 Гц до 20 кГц. При оценке уровня громкости звука в качестве эталона звукового давления выбирается его минимальное значение на частоте 1 кГц, при котором звук становится уже слышимым. Уровень громкости, создаваемый различными источниками, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Уровень громкости децибелл (дБ)	*Источник звука*
0	Порог слышимости
10	Слабое дыхание
20	Шум в студии
30	Тихий шопот
40	Спокойная комната
50	Тихая улица
70	Разговор
80	*Шумная улица*
100	Громкие крики
110	Мотоцикл без глушителя
120	Реактивный самолет на старте
130	Болевой порог

Число децибелл n при сравнении двух значений громкости определяется соотношением

$$n = 20 \lg \frac{P_1}{P_2}$$

где P_1 и P_2 – значения сравниваемых звуковых давлений.

Из табл. 1 видно, что диапазон звукового давления от порога слышимости до болевого порога равен 130 дБ. При этом надо учитывать, что *чувствительность уха к звукам различной частоты отличается на* 60 дБ при малых уровнях громкости и на 20 дБ – при больших. Кривые

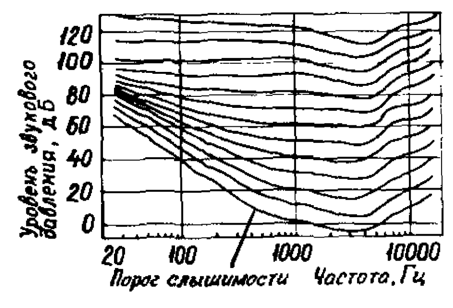


Рис. 1. Кривые одинаковой громкости

одинаковой громкости приведены на рис. 1. Каждая кривая на рис. 1 соединяет уровни синусоидальных сигналов, воспринимаемых на слух, как одинаковых по громкости.

Под динамическим диапазоном понимают разность между максимальным и минимальным уровнями сигналов. Динамический диапазон слышимых человеческим ухом звуков составляет 130 дБ, а музыкальных произведений различных жанров (эстрадная, симфоническая) – 75 дБ. В студиях звукозаписи обычно применяется сжатие динамического диапазона музыкальных программ с помощью специальных методов, так как он для существующих систем аналоговой звуковой записи невелик – 50–60 дБ.

При проектировании перспективных высококачественных цифровых систем звукозаписи обычно ориентируются на всю область слышимых звуков, так как динамический диапазон музыкальных программ имеет тенденцию к расширению за счет создания новых музыкальных инструментов и аппаратуры для получения специальных звуковых эффектов. К тому же система звукозаписи, имеющая динамический диапазон, соответствующий динамическому диапазону слуха человека, способна обеспечить полный "эффект присутствия" при прослушивании специальных звуковых программ – шумов леса, моря, грозы и т.п.

Слабые звуки нижней части динамического диапазона звукового сигнала в реальных условиях "заглушаются" естественными шумами. Так уровень шумов в тихой комнате составляет не менее 30–40 дБ. Поэтому диапазон 90–100 дБ является достаточным для перспективной системы звукозаписи. Различия в значении динамического диапазона для разных людей невелики. Искажения и шумы системы звукозаписи, лежащие ниже порога слышимости, не воспринимаются слушателем. Поэтому для системы, имеющей такой уровень искажений и такое значение динамического диапазона, дальнейшее улучшение физических параметров не имеет смысла.

В аппарате звукозаписи минимальный уровень определяется шумами, а максимальный – нелинейными искажениями, которые резко возрастают при превышении сигналом определенного уровня. *Коэффициент нелинейных искажений* характеризует тот факт, что при подаче

на вход усилителя синусоидального сигнала определенной частоты на его выходе из-за нелинейности, присущей любому звукопроизводящему устройству, появляются гармоники основной частоты: вторая, третья и т.д. Если A_1 – амплитуда основной частоты, а A_2, A_3 – амплитуды соответствующих гармоник, то коэффициент нелинейных искажений D равен (в процентах):

$$D = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 \ldots}}{A_1} 100.$$

При этом нечетные гармоники на слух ощущаются менее заметно. *При прослушивании музыки* 5 процентов слушателей ощущали искажения, когда содержание четных гармоник составляло 0,8 %, а нечетных – 2,8 %. При прослушивании голоса искажения ощущались при 0,8 % четных гармоник и 6 % нечетных. У современной звуковоспроизводящей аппаратуры коэффициент нелинейных искажений обычно менее 0,1 %.

Зависимость сквозного коэффициента передачи амплитуды сигнала от частоты называется *амплитудно–частотной характеристикой* (АЧХ). Результаты экспериментальных исследований по определению чувствительности слуха к неравномерности АЧХ показали, что ее отклонения на частотах 100 Гц и 10 кГц по отношению к частоте 1 кГц от +2 до –4 дБ практически не ощущаются на слух. Однако границей чувствительности слуха считают отклонения от +1 до –2 дБ.

Характерными параметрами для аппаратуры звукозаписи являются также *коэффициент детонации* и *уровень разделения сигналов в стереоканалах*. На практике стремятся получить минимальные, близкие к нулевым, значения коэффициента детонации, а уровень разделения каналов – близкий к динамическому диапазону.

ЗАПИСЬ НА МАГНИТНУЮ ЛЕНТУ

Принцип магнитной записи прост. Тонкая лента, покрытая слоем из магнитотвердого вещества, протягивается с постоянной скоростью мимо магнитной головки. Магнитная головка представляет собой кольцевой сердечник, на котором размещена обмотка. При записи в обмотку головки подается переменный ток записываемого сигнала. Сердечник имеет зазор, прилегающий к поверхности ленты. Магнитный поток, возбуждаемый в сердечнике током обмотки, в области зазора выходит наружу и намагничивает ферромагнитный слой ленты в зависимости от изменения тока записи. При воспроизведении лента снова протягивается около магнитной головки, выводы которой подключаются к усилителю воспроизведения. Магнитный поток ленты, проходя через сердечник головки, наводит в ее обмотке ЭДС самоиндукции в полном соответствии с записываемым сигналом.. Таким образом, в процессе магнитной записи происходит преобразование изменений амплитуды сигнала в изменения намагниченности носителя, а временные изменения

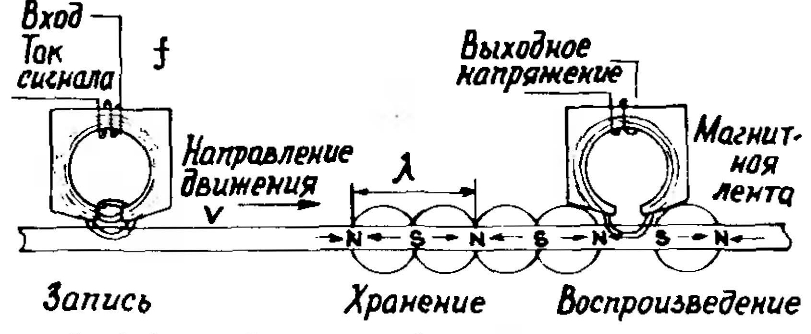


Рис. 2. Взаимодействие магнитной ленты и головок при записи и воспроизведении

преобразуются в расстояние на ленте между участками намагниченности (рис. 2). Сигнал с постоянной частотой, подаваемый в головку записи, образует на пленке регулярную структуру намагниченности, как бы состоящую из маленьких магнитиков, магнитную волну. Длина волны записанного на пленке сигнала зависит от частоты сигнала и скорости движения ленты относительно головки и определяется по формуле

$$\lambda = \frac{v}{f},$$

где λ – длина волны, м; v – скорость движения ленты м/с; f – частота сигнала, Гц. Значение минимальной длины волны, которую можно записать в данной системе магнитной записи, характеризует плотность записи этой системы.

При скорости движения ленты в обычном кассетном магнитофоне 4,76 см/с и верхней частоте звукового сигнала 14–16 кГц минимальная длина волны записи получается равной 3,0–3,5 мкм. Напомним, что 1 мкм – это тысячная доля миллиметра. Диаметр волоса составляет 60–100 мкм, длина волны видимого света – в пределах 0,4–0,8 мкм. Становится понятным, насколько сложно добиться широкой полосы частот записи при высокой плотности на единицу поверхности. Ведь зазор магнитной головки для воспроизведения должен быть не более половины длины волны. С другой стороны, материал магнитного слоя ленты должен обеспечить существование областей с противоположной намагниченностью на расстоянии меньше двух микрон, не допуская их взаимного размагничивания. Прежде, когда не удавалось изготавливать магнитные головки со столь малыми зазорами и магнитную ленту высокого качества, чтобы увеличить минимальную длину записи приходилось увеличивать скорость движения магнитной ленты. Еще одна проблема– уменьшение толщины ленты. Чем тоньше лента, тем больше ее войдет на стандартную катушку или в кассету, тем больше будет время записи. Тонкая гибкая лента лучше прижимается к рабочему зазору головки. Кроме того, лента должна быть прочной, не растяги-

ваться. Еще не так давно выпускались ленты на ацетатной основе для катушечных магнитофонов толщиной 55 мкм. Соременные ленты на лавсановой основе значительно тоньше – 27–18 мкм и менее.

Как на ленте фиксируется сигнал и почему он не исчезает?

Магнитный слой, как уже упоминалось, изготавливается из магнитотвердого ферромагнитного материала. В любом ферромагнетике содержатся элементарные "магнитики" – домены. Даже атом с одним электроном, вращающимся с некоторой скоростью вокруг ядра, является элементарным магнитом, так как движущийся заряд электрона создает кольцевой ток, имеющий свое собственное магнитное поле. Отдельно взятые магнитные поля атомов очень слабы, но в домене все элементарные магнитные поля атомов складываются и образуют магнитное поле домена. Если ферромагнетик не намагничен, то магнитные поля отдельных доменов ориентированы хаотично по отношению друг к другу, и результирующее магнитное поле равно нулю. Если же этот ферромагнетик поместить во внешнее магнитное поле, например, в виде сердечника в катушку индуктивности, то под воздействием этого поля магнитные поля доменов сориентируются в одном направлении. При этом к внешнему полю добавляются собственные поля доменов, и общее поле резко возрастает. Ферромагнетики характеризуются коэффициентом относительной магнитной проницаемости, показывающим, во сколько раз возрастает магнитная индукция в веществе по сравнению с внешним пространством. Относительная магнитная проницаемость может доходить у ферромагнетиков до нескольких десятков тысяч. Во столько же раз возрастает и магнитное поле в сердечнике. Поэтому при изготовлении различного рода катушек индуктивности, как правило, используются сердечники из ферромагнитного материала. Ярким примером служит сердечник магнитной головки. Для изготовления сердечников используются магнитомягкие ферромагнетики. При снятии внешнего магнитного поля у таких материалов индукция исчезает. Магнитотвердые же ферромагнетики сохраняют некоторую намагниченность и после полного снятия внешнего магнитного поля. Так изготавливают различного рода магниты. Рассмотрим, как происходит процесс намагничивания магнитотвердых материалов.

На рис.3 по горизонтали отложена напряженность внешнего магнитного поля Н. Она пропорциональна, например, силе тока в обмотке записывающей головки. По вертикали отложена магнитная индукция в магнитном материале. Начнем увеличивать ток в обмотке головки. На начальном участке кривой магнитная индукция в материале нарастает медленно, затем появляется участок быст-

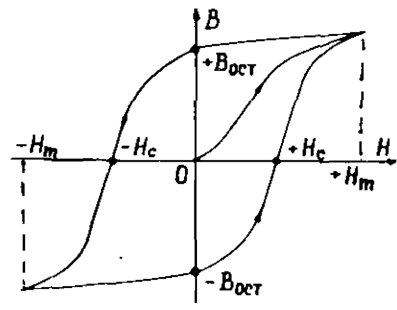


Рис. 3 Петля гистерезиса

рого роста индукции и, наконец, участок насыщения, когда при дальнейшем росте внешнего поля индукция не увеличивается. Предельная величина индукции магнитного слоя называется индукцией насыщения $B_{нас}$. Кривая называется основной кривой намагниченности. Теперь начнем уменьшать ток в обмотке головки. Домены в магнитном слое продолжают сохранять ориентацию, и магнитная индукция материала не уменьшается до нуля при обращении напряженности внешнего магнитного поля в нуль. Величина магнитной индукции при нулевом внешнем поле называется остаточной магнитной индукцией. Чем она больше, тем сильнее будет притягивать металлические предметы магнит, сделанный из этого материала, тем большим может быть уровень записи на магнитной ленте из этого же материала. Чтобы размагнитить материал слоя, надо подать в обмотку ток противоположного направления. Напряженность поля, при которой индукция В обратится в нуль, называется коэрцитивной силой. Чем больше коэрцитивная сила, тем труднее размагнитить материал, тем меньше по размеру соседние домены с противоположной намагниченностью сохраняют ее. Увеличив затем ток в обмотке (в обратном направлении), намагнитим материал, но "наоборот". Периодически перемагничивая материал, получаем некоторую замкнутую кривую, называемую петлей гистерезиса. Чем больше площадь петли, тем большую работу на перемагничивание надо затратить.

Как производится запись сигналов обычным аналоговым магнитофоном?

Непосредственно записать сигнал звуковых частот, подав его на выводы обмотки головки, конечно можно, но при этом качество записи будет совершенно неудовлетворительным. Для объяснения этого обратимся к основной кривой намагниченности (рис.4). Она показана

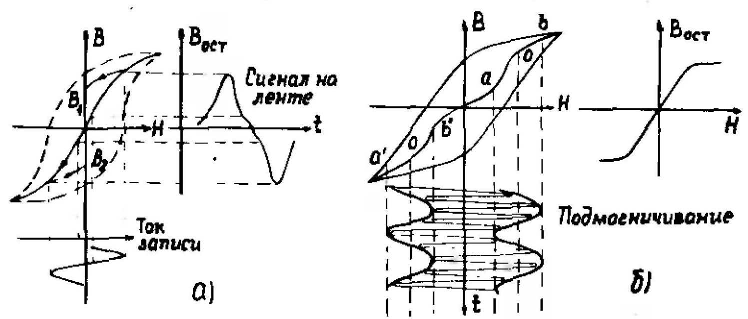


Рис. 4. Процесс магнитной записи: запись без подмагничивания (*а*); запись с высококачественным подмагничиванием (*б*)

для намагничивания в обоих направлениях. Поскольку начальный участок кривой пологий, то намагничивание ленты при слабых сигналах происходит плохо. Искажения сигнала при этом будут недопустимо велики. Современный метод записи, применяющийся в аналоговых

звуковых магнитофонах, использует линеаризацию кривой намагниченности с помощью высокочастотного сигнала подмагничивания. При записи в обмотку головки наряду со звуковым подается высокочастотный сигнал, имеющий значительно больший уровень, чем звуковой. Высокочастотное магнитное поле, вызываемое этим сигналом, как бы раскачивает домены ферромагнетика, разрушая жесткие связи между ними и облегчая намагничивание ленты. Можно сказать, что напряжение подмагничивания обеспечивает запись сигналов с использованием наиболее линейных участков основной кривой намагниченности. Так как напряжение подмагничивания успевает перемагнитить ленту несколько раз за время прохода мимо зазора головки, то эти колебания практически не остаются в записи. Частота тока подмагничивания современных магнитофонов обычно лежит в пределах 50–100 кГц. Для определенной частоты сигнала существует оптимальное значение тока подмагничивания, при котором намагниченность магнитного слоя максимальна. При этом, к сожалению, для других частот сигнала это значение оказывается далеко не оптимальным, что приводит к снижению уровня намагниченности для этих частот и возрастанию гармонических искажений. На практике при выборе значения тока подмагничивания приходится идти на компромисс: для расширения динамического диапазона в области верхних частот приходится уменьшать ток подмагничивания, но при этом возрастают нелинейные искажения, и снижается отдача ленты на средних частотах. Для лент, различающихся по магнитным свойствам, значение оптимального тока подмагничивания также различно. Даже вариации магнитных свойств ленты одного типа, неизбежно возникающие в процессе производства, требуют подстройки тока подмагничивания. В высококлассных магнитофонах вводят специальную регулировку тока подмагничивания, осуществляемую перед каждой записью на новую ленту. Иначе трудно обеспечить стабильность параметров качества записи, имеющих жесткие требования. В последнее время, благодаря использованию микропроцессорного управления, установка оптимальных токов подмагничивания и записи осуществляется без участия оператора. Но это, конечно, вызывает удорожание моделей магнитофонов, снабженных такими устройствами.

Динамический диапазон аналоговой записи определяется, с одной стороны, собственными шумами магнитной ленты, с другой – максимально возможным уровнем записи, при котором нелинейные искажения не превышают определенной величины. Шум ленты вызывается некоторым различием магнитных свойств отдельных доменов, а также неравномерным распределением магнитных частиц на поверхности, что всегда имеет место при реальной технологии производства магнитной ленты. Уровень шума усилителя воспроизведения в высококачественных магнитофонах обычно ниже уровня шума ленты, что достигается применением высококачественнх магнитных головок и электронных компонентов. Уровень шума записи зависит от степени симметричности

формы тока подмагничивания – при ассиметрии тока подмагничивания в головке записи уровень шума фонограммы повышается.

Динамический диапазон современных бытовых магнитофонов достигает 50–60 дБ, для студийных магнитофонов со скоростью движения ленты 38 см/с – до 75 дБ. Использование различного рода систем шумопонижения позволяет улучшить отношение сигнал-шум на выходе магнитофона, но совершенно бессильно устранить влияние так называемого модуляционного шума, уровень которого обычно превышает 40 дБ. Кроме того, компандерные системы шумопонижения (DOLBY-B, DOLBY-C, dbx и т.д.) требуют высокой стабильности параметров каналов воспроизведения звукового сигнала. К тому же системы шумопонижения приводят к динамическим искажениям резко изменяющихся звуковых сигналов, характерных для симфонической музыки, ударных инструментов и т.д.

Модуляционные шумы аналогового магнитофона вызываются рядом причин: непостоянством контакта лента-головка, поперечными колебаниями ленты, приводящими к некоторому несовпадению дорожек записи и воспроизведения, а также неоднородностью магнитного слоя. Поперечные колебания ленты и неоднородность ее магнитного слоя приводят к модуляции до 10% амплитуды сигнала, не зависящей от частоты записываемого сигнала. Непостоянство же контакта ленты с головкой, возникающее из-за шероховатости ленты, загрязнения, рывков при транспортировании ленты неидеальным лентопротяжным механизмом, приводит к модуляции сигналов преимущественно верхних частот. Причем уровень модуляции верхних частот сигнала в бытовых магнитофонах доходит до 30–50%, что намного превышает уровень заметности такого рода искажений.

Коэффициент нелинейных искажений, как и уровень шума, определяется свойствами ленты, а точнее, нелинейностью безгистерезисной кривой намагниченности носителя. Нелинейность кривой существенно зависит от значения тока подмагничивания и уровня тока записи. При уменьшении тока подмагничивания относительно оптимального с точки зрения отдачи ленты, а также при увеличении уровня записи искажения возрастают. Современные ленты и головки не позволяют получить искажения менее 0,2%. К тому же, для достижения такого уровня искажений приходится снижать уровень записываемого сигнала, а значит, и отношение сигнал-шум. Например, если коэффициент нелинейных искажений должен быть менее 1%, то остаточная намагниченность носителя должна составлять не более 25% от максимально возможной для данной ленты. Обычно в качестве максимального уровня записи выбирается значение, при котором коэффициент третьей гармоники синусоидального сигнала, записанного на ленте, достигает значения в 3%. В этом случае отношение сигнал-шум будет характеризовать динамический диапазон магнитофона.

Серьезной причиной, снижающей качество звуковоспроизведения при магнитной записи звука, является непостоянство скорости движения

ленты (детонация), приводящее к паразитной модуляции исходного сигнала. Детонация вызывается несовершенством ЛПМ магнитофона, нестабильностью сил трения ленты о направляющие стойки, магнитные головки, проскальзыванием ленты относительно ведущего вала и другими причинами. Несовершенство ЛПМ выражается в биениях ведущего вала и прижимного ролика, других вращающихся частей, в качании роторов электродвигателей, в нестабильности момента трения в подшипниках и т.п. Медленные (менее 0,1 Гц) именения частоты воспроизводимого сигнала проявляются как смещение тональности и называются дрейфом скорости. Если частота колебаний скорости находится в пределах 0,1–10 Гц, искажения приобретают характер подвывания, плавания звука. При частоте колебаний скорости выше 10 Гц искажения воспринимаются как хриплость, вибрация звучания. Искажения, вызываемые детонацией, наиболее заметны при частотах модуляции 2–10 Гц. Пороговый уровень заметности детонации для монотонного сигнала может составлять 0,01–0,15 %. Для музыкальных произведений порог обычно повышается до 0,3–0,4 %.

Для снижения уровня детонации все вращающиеся детали ЛПМ (маховики, валы, различные шкивы и ролики) приходится изготавливать с минимальными радиальными биениями, применять прецизионные подшипники. Поверхности деталей, соприкасающиеся с лентой, необходимо обрабатывать по высокому классу чистоты. Двигатель ведущего вала должен иметь малую неравномерность скорости вращения, все вращающиеся детали должны быть тщательно отбалансированы. В процессе эксплуатации магнитофона износ подшипников, стоек, деформация эластичного слоя прижимного ролика, снижение эластичности пассиков часто приводят к увеличению детонации и изменению средней скорости движения ленты, что вызывает необходимость периодической наладки и ремонта.

Еще одна проблема, с которой постоянно сталкиваются разработчики аналоговых магнитофонов, – снижение уровня мешающих сигналов и помех, которые могут присутствовать в выходном сигнале магнитофона в виде фона, рокота "лишних" музыкальных программ и т.п.

Эти помехи обычно ниже уровня шумов ленты, однако они хорошо различимы благодаря своей "организованности". Фон с частотой сети создается чаще всего электрическими и манитными наводками от силового трансформатора и электродвигателя. Для уменьшения уровня фона приходится тщательно экранировать магнитные головки, усилители воспроизведения, а иногда – трансформатор и электродвигатель. Рокот, создаваемый двигателем и другими вращающимися частями ЛПМ, попадает в тракт воспроизведения чисто механическим путем. Малейшие колебания витков обмотки, да и самой воспроизводящей головки в магнитном поле деталей механизма, имеющих остаточную намагниченность, приводят к возникновению ЭДС индукции помехи. В процессе эксплуатации магнитофона для снижения такого рода помех и уровня

шума, создаваемого намагниченными деталями и головкой, необходимо периодически производить размагничивание тракта движения ленты и магнитных головок.

Помехи появляются также из-за недостаточного уровня стирания, проникновения сигнала с соседней дорожки записи и другого стереоканала, наводок от радиотрансляции сети и детектирования сигналов местных мощных радиовещательных станций из-за неправильного экранирования и проектирования усилителя воспроизведения. Переходные помехи между стереоканалами вызываются, как правило, паразитными индуктивными и емкостными связями между секциями блока головок, а также между каналами записи-воспроизведения и увеличиваются с ростом частоты. Проникновение сигнала с соседней дорожки записи обусловлено увеличением эффективной ширины дорожки записи с уменьшением частоты и проявляется, в основном, в диапазоне частот 30–100 Гц.

К числу помех относится также копир-эффект. При хранении ленты происходит частичное взаимное намагничивание соседних слоев ленты, что приводит к ухудшению отношения сигнал-шум и снижению уровня воспроизводимого сигнала. Уровень "заметности" помехи, вызываемой копир-эффектом, достигает 60 дБ. Для его снижения необходимо в процессе хранения периодически производить перемотку ленты.

Необходимо упомянуть о таком недостатке аналоговой магнитной звукозаписи, хорошо известном любителям Hi-Fi, как ухудшение качества звука при каждой перезаписи фонограмм с магнитофона на магнитофон.

Итак, аналоговой звукозаписи на магнитной ленте присущи следующие недостатки: недостаточный динамический диапазон, особенно в области верхних звуковых частот; повышенные (по современным понятиям) нелинейные искажения, детонация и модуляционные шумы; увеличение всех видов искажений при каждой последующей перезаписи или дублировании; нестабильность частотных характеристик из-за технологического разброса параметров лент, износа головок, ЛПМ, нестабильности тока подмагничивания; большой уровень перекрестных помех; копир-эффект.

Повторим, что каждый из перечисленных недостатков может быть снижен в аналоговом магнитофоне ниже уровня заметности. Однако борьба с каждым из них и в особенности попытка одновременного преодоления их совокупности приводят к недопустимому удорожанию аппаратуры массового потребления. Можно сказать, что аналоговые магнитофоны в лучших своих моделях реализовали все резервы дальнейшего совершенствования.

ЦИФРОВАЯ ЗВУКОЗАПИСЬ

ЦИФРОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИГНАЛА

Чем отличаются аналоговые и цифровые сигналы?

Аналоговый, или непрерывный, сигнал может принимать любое значение в пределах динамического диапазона системы звуковоспроизведения. Такой сигнал является аналогом некоторого физического процесса. Это может быть, например, напряжение на выходе микрофона, изменяющееся пропорционально изменению звукового давления, воздействующего на его вход.

В процессе передачи от микрофона к слушателю сигнал претерпевает многочисленные преобразования: многократная перезапись и монтаж *мастер-ленты, запись на диск-оригинал или компакт-кассету, передача* программы с помощью радиовещательного передатчика, тиражирование пластинок и т.д. К исходному сигналу при этом неизбежно добавляются посторонние воздействия, искажающие его форму: шумы усилительных устройств и носителя записи, помехи эфира, нелинейные искажения, помехи в виде фона, "рокота" и т.д. Неравномерность перемещения носителя записи, отличия скорости при записи и воспроизведении приводят к временным искажениям сигнала. Поскольку исходная форма аналогового сигнала заранее неизвестна, то все эти искажения устранить практически невозможно (рис. 5).



Рис. 5. Искажение сигнала при звукопередаче

Иначе обстоит дело с цифровыми, или дискретными, сигналами. В отличие от аналоговых дискретные сигналы принимают лишь строго определенные значения. Наиболее широко используются цифровые двоичные сигналы, имеющие всего два значения – "есть сигнал", "нет сигнала". Для их обозначения используется двоичный цифровой код, имеющий всего две цифры. *Наличие сигнала можно обозначить цифрой* "1", отсутствие – "0". Ставя в соответствие буквам алфавита двоичные цифровые сигналы, на телеграфе с их помощью передают различные сообщения. Например, для передачи 32 букв алфавита требуются

цифровые двоичные сигналы, содержащие не менее пяти двоичных цифр или разрядов. При этом число возможных комбинаций, отображающих буквы, составит $2^5 = 32$. Соответствие между буквами и комбинациями может быть выбрано произвольно, буква А может быть передана последовательностью "00000", Б – "00001", В – "00010" и т.д. Любое число в десятичной системе счисления легко представляется в двоичном коде, как показано в табл. 2.

Таблица 2

Десятичный код	Прямой двоичный код 8–4–2–1	Десятичный код	Прямой двоичный код 8–4–2–1
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	10	1010
3	0011	11	1011
4	0100	12	1100
5	0101	13	1101
6	0110	14	1110
7	0111	15	1111

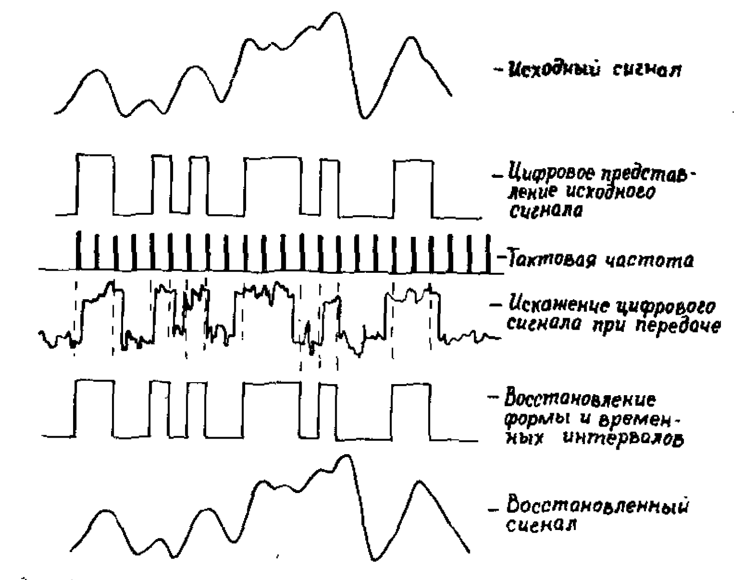


Рис. 6. Процесс передачи и восстановления цифрового сигнала

Для неискаженного приема сообщения, посланного, например, по телеграфу, надо безошибочно восстановить исходную последовательность единиц и нулей.

В отличие от аналогового цифровой сигнал, искаженный помехами, можно восстановить (регенерировать) полностью. Для этого достаточно принять решение о наличии ("1") или отсутствии ("0") сигнала. Длительность цифрового сигнала при передаче выбирается строго определенной, и при приеме возможно полное устранение временных искажений. Свойства цифрового сигнала иллюстрирует рис. 6.

С помощью цифровых двоичных сигналов можно передавать, *записывать и воспроизводить не только буквы и цифры, но и звук, и* даже изображение. Для этого необходимо преобразовать звук и изображение в цифровую форму при передаче и записи, и обратно в аналоговую – при приеме и воспроизведении.

ДИСКРЕТИЗАЦИЯ И КВАНТОВАНИЕ

Цифровая система звукозаписи требует представления входного аналогового сигнала в цифровом виде, а выходного цифрового сигнала – в аналоговом. Преобразование аналогового сигнала в цифровой называется аналого-цифровым преобразованием, а устройство, осуществляющее это преобразование – аналого-цифровым преобразователем (АЦП). При преобразовании непрерывный аналоговый сигнал переводится в ряд дискретных отсчетов, каждому из которых ставится в соответствие число, характеризующее аналоговый сигнал в этой точке с определенной точностью. Числа, соответствующие отсчетам, переводятся в двоичную систему счисления для представления сигнала в цифровом *виде, т.е. каждому отсчету сигнала ставится в соответствие определенная* комбинация из нулей и единиц.

Точность представления сигнала зависит от разрядности АЦП. Процесс разбиения сигнала на отсчеты, носящий название дискретизации, и процесс квантования – измерение с округлением до разряда АЦП – показаны для 4-разрядного АЦП на рис. 7.

Преобразование последовательности цифр в первичный вид сигнала называется цифро-аналоговым преобразованием, а устройство, его выполняющее,– цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП).

Переход от дискретного сигнала к цифровому, т.е. операция квантования осуществляется в общем случае с ошибкой. Погрешность квантования, как это нетрудно увидеть из рис.7, определяется числом разрядов квантования. В случае, представленном на рис. 7, где используются 4-разрядные числа, весь диапазон изменения аналогового сигнала можно разделить на 16 частей (квантов). Точность представления при этом составит 1/16 или 6,25%.

Квантование сигналов можно описать графически с помощью характеристики квантования, где по горизонтальной оси отложены

Рис. 7. Дискретизация, квантование и кодирование аналогового сигнала

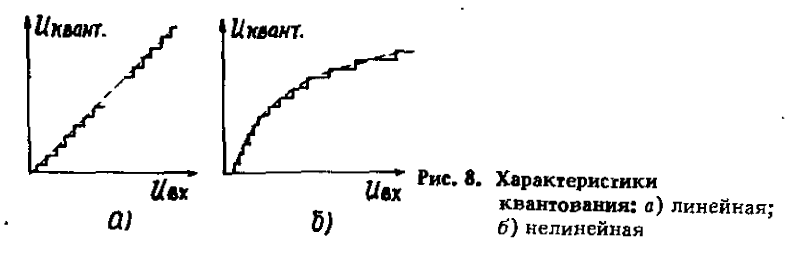


Рис. 8. Характеристики квантования: *а*) линейная; *б*) нелинейная

значения непрерывного сигнала, а по вертикальной – значения квантового сигнала (рис.8). Шаг квантования определяется числом разрядов АЦП. Квантование с постоянным шагом называется равномерным или линейным. Иногда применяется нелинейное квантование. Оно позволяет обеспечить достаточно большой динамический диапазон при снижении разрядности АЦП. При этом характеристика квантования имеет вид кривой, близкой к логарифмической. При квантовании малых сигналов шаг квантования оказывается малым, а точность передачи сигнала – достаточно высокой (не хуже, чем у АЦП с линейной характеристикой

квантования при равных динамических диапазонах). При больших значениях сигнала шаг квантования увеличивается, что приводит к возрастанию ошибки (по сравнению с АЦП с линейной характеристикой). Но так как сигнал в этом случае имеет больший вес, шум квантования может быть эффективно замаскирован. Кривая для нелинейного квантования обычно строится из отрезков прямых, разбивающих динамический диапазон преобразования на поддиапазоны, в пределах которых шаг квантования не изменяется, а при переходе к новому поддиапазону соответствующим образом увеличивается или уменьшается.

Хотя преобразователи с нелинейной характеристикой квантования обеспечивают уменьшение разрядности и, как следствие, уменьшение скорости цифрового потока, они могут являться источником нежелательных искажений, сходных с интермодуляционными. Слабые сигналы в присутствии сигнала с большой амплитудой из-за большой ошибки квантования могут подавляться на верхнем поддиапазоне. АЦП с нелинейной характеристикой, как правило, реализуется на основе линейного АЦП с более высокой разрядностью. Преобразование линейной характеристики в нелинейную осуществляется после АЦП специальным цифровым устройством. А это позволяет получить стабильные характеристики преобразования. АЦП с нелинейной характеристикой используются в современной цифровой звукозаписывающей аппаратуре, в основном, только в целях уменьшения скорости передачи цифрового сигнала (снижение полосы частот записи или повышения информационной плотности записи).

Число уровней квантования n и число двоичных разрядов АЦП определяют динамический диапазон преобразования. Динамический диапазон (в дБ) от числа разрядов АЦП или ЦАП определяется выражением

$$D = 6n + 1{,}8,$$

где n – число двоичных разрядов.

Задаваясь требуемым динамическим диапазоном цифровой системы звукозаписи, можно определить необходимое число разрядов преобразования. Чтобы исключить все проблемы, связанные с искажениями и шумами квантования, желательно иметь 18-разрядные АЦП и ЦАП. При этом динамический диапазон составит 110 дБ, а шумы квантования и искажения окажутся за порогом слышимости. Но увеличение разрядности АЦП требует повышения скорости передачи цифрового сигнала, а это, в свою очередь, требует расширения полосы частот записи. К тому же техническая реализация 18-разрядных преобразователей достаточно сложна. С учетом психофизиологических факторов восприятия звуковой информации достаточным является значение динамического диапазона в 90 дБ, что обеспечивается 16-разрядным преобразователем. Так как кратковременные ограничения сигнала незаметны для человеческого

слуха, реальный динамический диапазон 16-разрядных преобразователей может достигать 106–110 дБ при записи сигнала с некоторым превышением максимального уровня преобразования.

Квантование малых по амплитуде аналоговых сигналов имеет некоторые особенности. Ошибки квантования, получающиеся в процессе аналого-цифрового преобразования, больше похожи на искажения сложного вида, чем на шум.

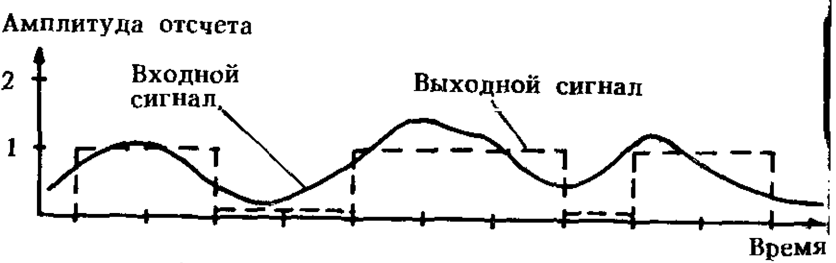


Рис. 9. Квантование сигнала малой амплитуды

Рассмотрим случай, изображенный на рис.9. Квантованный сигнал имеет форму меандра и состоит, следовательно, из бесконечного ряда нечетных гармоник. В данном случае квантование приводит к результату, эквивалентному гармоническим искажениям в аналоговых системах. Гармоники, возникающие при квантовании, и образуемые ими частоты создают так называемый шум квантования. Этот шум, очевидно, тем меньше, чем больше число разрядов квантования. При фиксированном числе разрядов квантования (определяемом сложностью аппаратуры) шум квантования можно существенно уменьшить, если изменение ошибки квантования задать случайным образом. Для ослабления слышимости шума квантования обычно во входной аналоговый сигнал вводится шумоподобный маскирующий сигнал , преобразующий неприятные на слух искажения слабого сигнала в "мягкий" белый шум.

Дискретизация – отсчет точек непрерывного аналогового сигнала в определенные моменты времени. Число отсчетов в секунду называется частотой дискретизации. Частота дискретизации, согласно теории, должна быть, по крайней мере, в два раза выше максимальной частоты преобразуемого аналогового сигнала. Для сигналов звуковой частоты она должна составлять не менее (20 кГц · 2) = 40 кГц. Другими словами, каждые два соседних отсчета должны отстоять друг от друга на 25 мкс.

Если известны частота дискретизации и число разрядов квантования, то можно получить скорость передачи (поток информации), которая для стереосигнала при частоте дискретизации 40 кГц и количестве разрядов квантования 16 составит $40 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 16$ Бит/с = 1,28 МБит/с.

Если число разрядов АЦП и ЦАП определяет динамический диапазон, то значение частоты дискретизации определяет ширину полосы частот сигнала, которая может быть записана в данной системе цифровой звукозаписи. Ширина этой полосы не может быть выше половины

значения частоты дискретизации. Дело в том, что спектр сигнала, преобразованного с помощью АЦП в цифровую форму, имеет периодический характер.(Спектр сигнала – это его отображение, характеризующее интенсивность и распределение частотных составляющих сигнала. *Любой сложный сигнал может быть представлен как сумма* простейших синусоидальных колебаний разной частоты и амплитуды – это будет спектр этого сигнала). Сигнал после аналого-цифрового преобразования имеет кроме низкочастотной части спектра, отображающей *аналоговый сигнал, еще и высокочастотные компоненты:* низкочастотный спектр сигнала повторяется в виде боковых полос с центрами в точках, кратных частоте дискретизации ($f_д$, $2f_д$, $3f_д$ и т.д.). Спектр цифрового сигнала , или сигнала с импульсно-кодовой модуляцией *(ИКМ-сигнала), показан на рис. 10,а* .

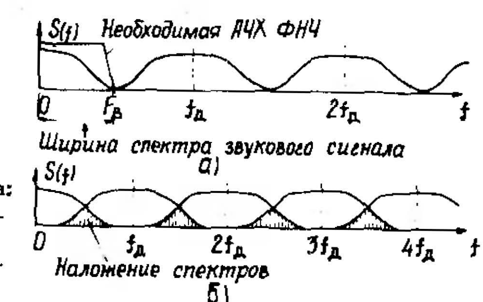


Рис.10. Спектр ИКМ-сигнала:
а) частота дискретизации выбрана правильно;
б) частота дискретизации недостаточна

Сигнал с полосой частот до 20 кГц может быть преобразован без искажений с минимальным значением частоты дискретизации 40 кГц. При уменьшении частоты дискретизации произойдет наложение низкочастотной *части спектра и боковой полосы с центром в точке* $f_д$. Наложение спектров приводит к появлению новых спектральных составляющих в сигнале, а, значит, к невозможности его правильного восстановления в аналоговую форму (рис. 10,б).

Ярким примером наложения спектров может быть пример, когда при просмотре фильма кажется, что колесо крутится с другой скоростью, не соответствующей скорости движения кареты, трактора и т.п., или даже крутится назад. Кинокамера является дискретизирующим устройством, и скорость колеса слишком велика для частоты кадров.

В звукозаписи наложение спектров можно убрать, установив перед АЦП фильтр низких частот (ФНЧ), подавляющий все частоты, лежащие выше половины частоты дискретизации. В общем, необходимо иметь *два фильтра – перед АЦП и после ЦАП.* ФНЧ на выходе ЦАП подавляет высокочастотные компоненты, выделяя звуковой сигнал. Так как на практике нельзя выполнить фильтр с "отвесным" спадом частотной характеристики, значение частоты дискретизации выбирается несколько больше, чем удвоенное значение верхней частоты звукового спектра.

Проявление всякого рода нелинейности тракта непосредственно за фильтром перед АЦП недопустимо. Например, ограничение сигнала в усилительном каскаде, стоящем после ФНЧ и перед АЦП, эквивалентно расширению спектра преобразуемого сигнала. Так как это происходит после ФНЧ и отфильтровать высокочастотные компоненты (больше $f_д/2$) невозможно, возникают искажения сигнала за счет наложения спектров при преобразовании.

ПРИНЦИП РАБОТЫ АЦП И ЦАП

Познакомимся более подробно с процессом аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразований. Поскольку АЦП, как правило, создаются на основе ЦАП, рассмотрим прежде всего принцип работы цифро-аналогового преобразователя.

Обычно ЦАП строится по одной из двух схем: суммирующий операционный усилитель с резистивной матрицей на выходе; многозвенная цепочка с постоянными резисторами с отводами, коммутируемыми в зависимости от преобразуемой цифровой величины. Обе схемы изображены на рис. 11.

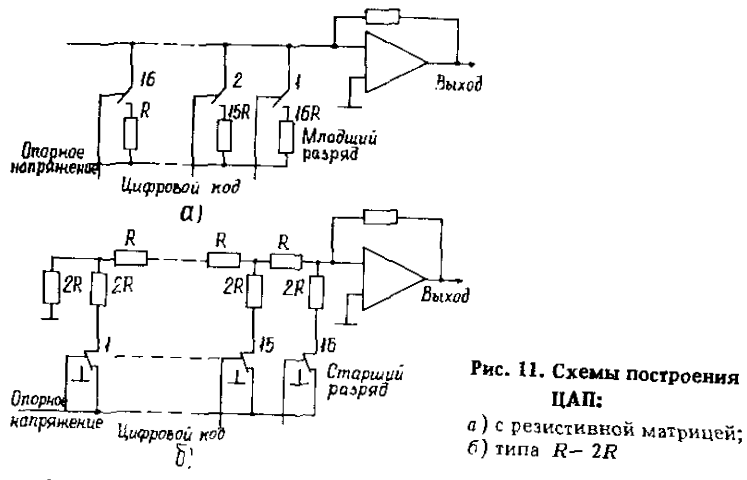


Рис. 11. Схемы построения ЦАП:
а) с резистивной матрицей;
б) типа $R-2R$

Рассмотрим преобразователь с резистивной матрицей (рис.11,*а*). Каждый двоичный разряд цифрового кода управляет своим ключом. Если в соотвествующем разряде входного кода цифра нуль, то ключ остается разомкнутым, а если единица, то ключ замыкается, опорное напряжение прикладывается к резистору и по нему течет ток. Выходное напряжение усилителя пропорцинально общему току и, следовательно, значению цифрового кода.

ЦАП с цепочкой резисторов R – 2R (рис.11,*б*) содержит по два

резистора на разряд. Один включен последовательно с разрядным ключом, а другой включен в суммирующую шину. Каждый из замкнутых ключей вносит в выходное напряжение свой вклад, образуя в результате суммарное выходное напряжение, соответствующее входному двоичному коду.

Из-за ограничений, связанных с технологией изготовления многозвенной цепочки резисторов, ЦАП с резистивной матрицей используется в преобразователях с малой разрешающей способностью (до 10 двоичных разрядов). Цепочка R – 2R сравнительно проста в изготовлении, так как в ней используется всего два значения сопротивлений, которые можно хорошо согласовать. Ключи в таком ЦАП должны коммутировать опорное напряжение с большой точностью. Теоретически это означает, что они должны иметь нулевое сопротивление в замкнутом и бесконечное – в разомкнутом состоянии.

Рассмотрим теперь преобразование напряжения в цифровой вид. Одним из способов аналого-цифрового преобразования является способ последовательных приближений. Познакомимся с работой такого АЦП (рис. 12).

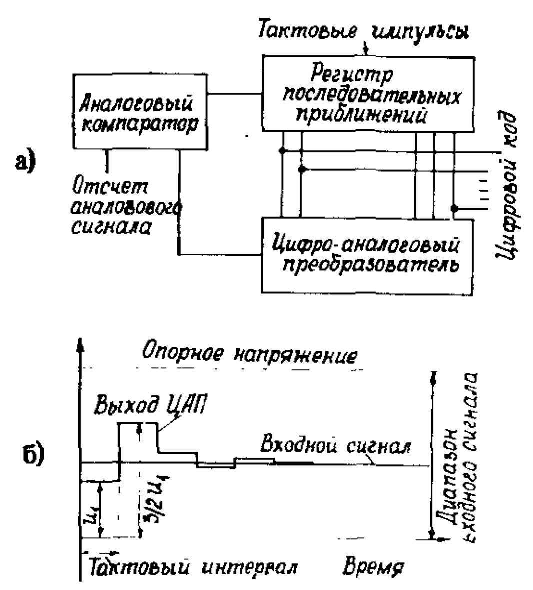


Рис.12. АЦП последовательных приближений: *а*) структурная схема; *б*) временная диаграмма

Отсчет непрерывного сигнала поступает на первый вход аналогового компаратора. Первым тактом на выходе регистра последовательных приближений устанавливается код, вызывающий на выходе ЦАП напряжение U_1. Это напряжение поступает на второй вход компаратора,

который производит сравнение двух напряжений, и результат сравнения фиксируется в старшем разряде регистра. Если $U_{вх} > U_1$, то в старший разряд регистра будет записана "1", а если $U_{вх} < U_1$ – то "0". В зависимости от результата первого такта вторым тактом на выходе регистра последовательных приближений будет установлен код, вызывающий на выходе ЦАП напряжение U_2. Если в первом такте в старший разряд была записана "1", то $U_2 = 3/2U_1$, а если "0" – то $U_2 = 1/2U_1$. Компаратор производит сравнение, и результат фиксируется в очередном разряде регистра. В следующем такте процесс повторяется. Количество тактов, необходимых для преобразования отсчета, зависит от разрядности АЦП. За один такт происходит вычисление одного разряда. При частоте генератора тактовых импульсов 1 МГц время преобразования 16-разрядного преобразователя составит 16 мкс.

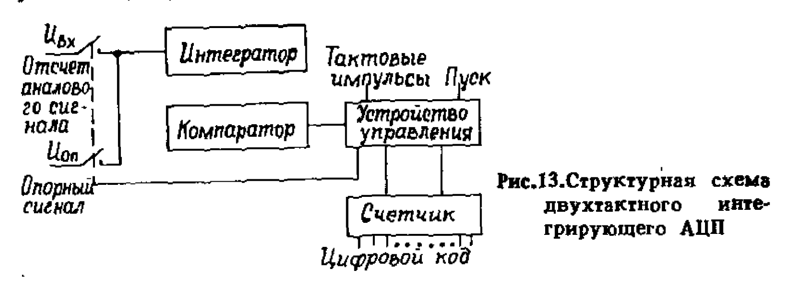


Рис.13. Структурная схема двухтактного интегрирующего АЦП

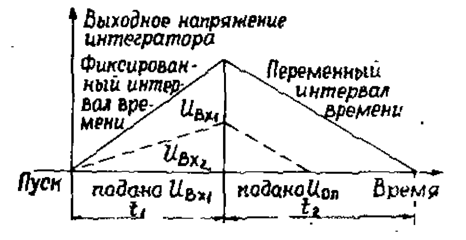
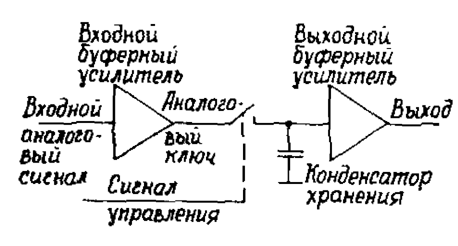
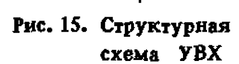


Рис.14. Диаграмма работы двухтактного интегрирующего АЦП

На рис. 13 изображена структурная схема, а на рис.14 – временная диаграмма, поясняющая работу другого типа аналого-цифрового преобразователя – двухтактного интегрирующего АЦП. В момент времени, определяемый сигналом "Пуск", к входу интегратора подключается входной сигнал $U_{вх}$. Напряжение на выходе интегратора начинает возрастать по линейному закону. Наклон прямой, соответствующей этому напряжению (начальный участок рис.14), определяется величиной $U_{вх}$, а длительность интервала t_1 –емкостью счетчика, который с момента начала преобразования начинает заполняться импульсами от тактового генератора. В момент переполнения счетчика к входу интегратора подключается опорное напряжение $U_{оп}$, которое имеет полярность, противоположную полярности $U_{вх}$. Напряжение на выходе интегратора начинает уменьшаться. Так как опорное напряжение

постоянно, то наклон прямой, соответствующей напряжению на выходе интегратора, будет постоянным. Нетрудно заметить, что интервал времени t_2 пропорционален величине входного напряжения, поскольку разрядность счетчика является величиной постоянной и определяется при проектировании АЦП. Величина интервала t_2 измеряется счетчиком, заполнение которого продолжается и после переполнения. Заполнение прекращается, когда выходное напряжение станет равным нулю. На этом процесс преобразования заканчивается. Код на выходе счетчика в этот момент времени пропорционален входному аналоговому сигналу и может быть зафиксирован как результат преобразования.




Рис. 15. Структурная схема УВХ

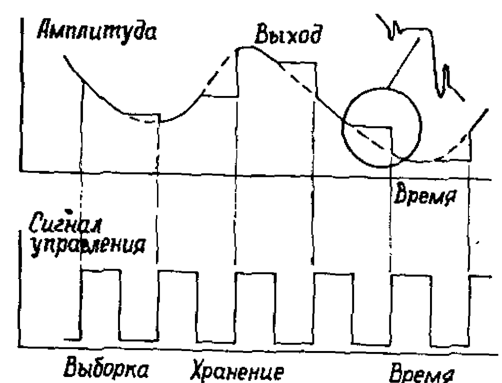


Рис. 16. Диаграмма работы УВХ

Как уже отмечалось, процесс аналого-цифрового преобразования одного отсчета аналогового сигнала должен составлять не более 25 мкс (при частоте преобразования 40 кГц). Для устранения ошибки, связанной с конечным временем преобразования любого АЦП, к его входу обычно подключается устройство, называемое устройством выборки и хранения (УВХ). Назначение УВХ определено его названием: оно предназначено для фиксации мгновенных значений входного аналогового сигнала в фиксированные моменты времени. УВХ в общем случае представляет собой ячейку аналоговой памяти, в которой в качестве запоминающего элемента используется высококачественный конденсатор. Структурная схема УВХ и диаграмма, поясняющая его работу, приведены на рис. 15, 16.

УВХ состоит из входного и выходного буферных усилителей, запоминающего конденсатора и ключа. Когда ключ замкнут (период выборки), напряжение на запоминающем конденсаторе изменяется в соответствии с изменениями аналогового сигнала. При размыкании ключа (период хранения) напряжение на конденсаторе фиксируется и сохраняется без изменения все время, пока АЦП осуществляет преобразование. Точность УВХ практически определяет точность преобразования и должна соответствовать разрядности применяемого АЦП. При количестве разрядов квантования, равном 16, и при входном напряжении 10 В точность УВХ должна быть не хуже $10/2^{16} = 0{,}15$ мВ.

АЦП И ЦАП ЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ С ТОКОВЫМ ИНТЕГРИРОВАНИЕМ

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи являются ключевыми компонентами любой цифровой системы магнитной звукозаписи, определяющими качество звучания.

С одной стороны, от этих устройств требуется обеспечение наиболее высоких качественных показателей системы звукозаписи, с другой — низкая стоимость и малое энергопотребление. При производстве необходимо достижение высокого качества микросхем АЦП и ЦАП с целью обеспечения временной стабильности их характеристик в процессе эксплуатации. Для аппаратуры с автономным питанием необходимы АЦП и ЦАП с низким напряжением питания. Классические АЦП и ЦАП, имеющие в своем составе резистивную матрицу R — 2R, слабо подходят для реализации 16-разрядных преобразователей, удовлетворяющих перечисленным выше требованиям. АЦП и ЦАП на основе матрицы R — 2R требуют точной и трудоемкой лазерной подгонки для достижения требуемой линейности передаточной характеристики. В таких преобразователях трудно достичь требуемой дифференциальной нелинейности характеристики. В то же время именно дифференциальная нелинейность создает наиболее заметные для человеческого слуха искажения.

Наиболее полно перечисленным требованиям удовлетворяют преобразователи, использующие принцип токового интегрирования, как обладающие наилучшей линейностью передаточной характеристики.

Принцип АЦП с токовым интегрированием заключается в следующем (рис.17). На первом этапе преобразования интегратор, входящий в состав устройства выборки-хранения, запоминает значение напряжения входного аналогового сигнала при размыкании ключа А. Затем с помощью ключа Б происходит подключение источника тока ИТ с одновременным включением в режим счета тактовых импульсов двоичного n-разрядного счетчика.

Подключение источника тока вызывает разряд интегратора, протекающий по линейному закону. Разряд продолжается до тех пор,

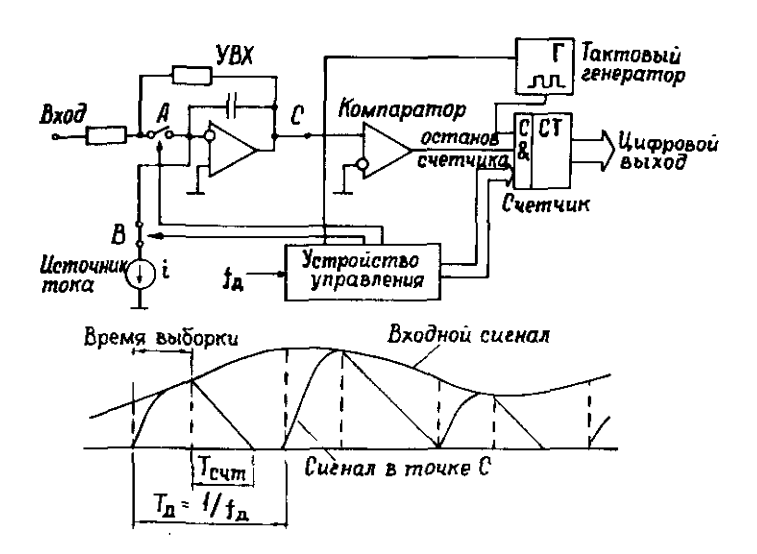


Рис. 17. Принцип работы АЦП с токовым интегрированием

пока напряжение на выходе интегратора не упадет до нуля, при этом на выходе компаратора появляется сигнал, останавливающий счетчик. Значение двоичного числа, зафиксированного в счетчике, отображает в цифровой форме значение напряжения аналогового сигнала, запомненное УВХ. Чем больше напряжение сигнала, тем дольше будет длиться разряд и тем больше будет число, зафиксированное в счетчике. Разрядность счетчика определяет разрядность АЦП. Но 16-разрядный АЦП с помощью этого метода реализовать непросто из-за слишком большого необходимого значения тактовой частоты генератора. Например, при частоте дискретизации 48 кГц время преобразования может составить 20,6 мкс. Отведем из этого времени 5,6 мкс на период выборки сигнала – установление выходного напряжения УВХ, равного входному напряжению для данного момента времени. Остается 15 мкс на время непосредственного преобразования ($T_{преоб}$) аналогового сигнала в цифровой. Если входной сигнал равен максимально допустимому для АЦП, то за это время 16-разрядный счетчик должен успеть заполниться.

При этом

$$T_{преоб} = \tau \cdot 2^n = \frac{1}{f_д} \cdot 2^n,$$

где количество разрядов АЦП n = 16. Откуда $\tau = \frac{T_{преоб}}{2^n} = \frac{15 \cdot 10^{-6}}{65536} =$ $= 2{,}29 \cdot 10^{-10}$ с, $f_\tau = \frac{1}{\tau} = 4{,}4 \cdot 10^9$ Гц = 4,4 ГГц.

Реализация цифровых схем, работающих на такой частоте, про-

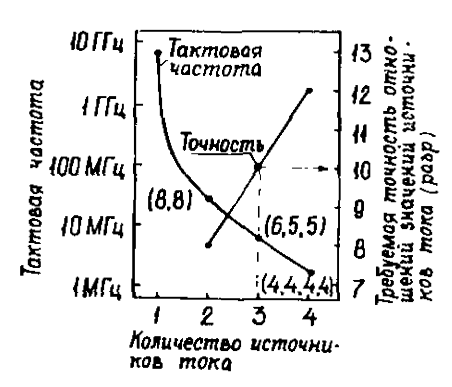


Рис.18. Зависимость тактовой частоты интегрирующего АЦП от количества источников тока

блематична. Выход из этого положения состоит в применении нескольких источников тока, значения токов в которых отличаются друг от друга в число раз, кратное 2^n.

В ЦАП и АЦП звуковых сигналов применяется от двух до трех источников тока. Значение тактовой частоты при этом снижается на несколько порядков. На рис. 18 приведена зависимость требуемой тактовой частоты от количества источников тока. Вторая кривая показывает требуемую точность соотношения значений токов этих источников. Например, при использовании трех источников токов, значения которых относятся друг к другу как $2^{10} : 2^5 : 1$, тактовая частота генератора равна 7 МГц, а точность соотношения токов должна быть не менее 10 разрядов. Невыполнение этого условия вызывает появление "изломов" в передаточной характеристике и, как следствие, возрастание нелинейных искажений АЦП и ЦАП.

Рассмотрим принцип действия ЦАП, работающего по методу тройного токового интегрирования.

16-разрядное слово ИКМ-данных разделяется на 6 старших, 5 средних и 5 младших разрядов. Источники, имеющие токи, относящиеся как $2^{10} : 2^5 : 1$, заряжают конденсатор интегратора, причем длительность подсоединения каждого источника тока зависит от значения цифрового сигнала, записанного в счетчике, имеющие соответственно разрядность в шесть, пять и пять разрядов. Таким образом, на выходе интегратора формируется сигнал, пропорциональный 16-разрядному слову, запомненному предварительно по частям в счетчиках. После окончания счета счетчик тока отключается с помощью ключей К1 – К3 от интегратора, а выходное напряжение интегратора запоминается в устройстве выборки-хранения, вход которого является выходом ЦАП. Затем с помощью ключа К4 осуществляется разряд напряжения на емкости интегратора для подготовки к новому циклу пеобразования.

Рис. 19 поясняет работу ЦАП. Так как токи источников текут в одном направлении, выходное напряжение ЦАП является однополярным

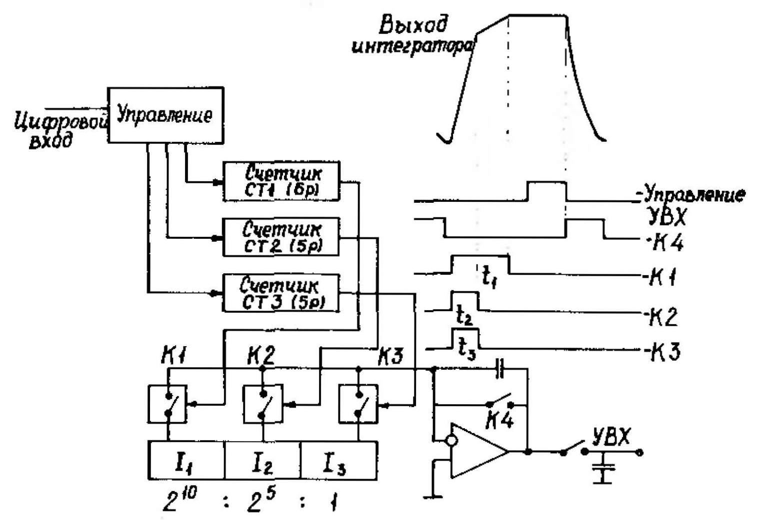


Рис. 19. ЦАП с тройным токовым интегрированием

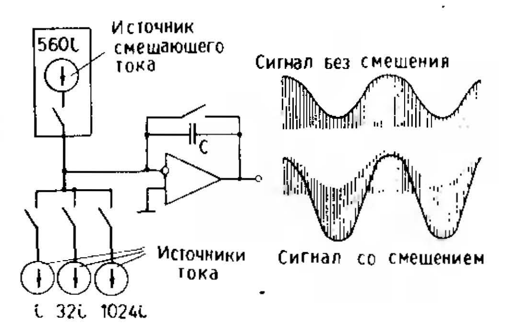


Рис. 20. Принцип получения двухполярного выходного напряжения

(рис.20). Для получения двухполярного выходного напряжения и более полного использования напряжения питания на вход интегратора добавляется постоянный смещающий ток, имеющий противоположное по сравнению с этими токами направление. В результате выходное напряжение становится двухполярным, а размах его увеличивается в два раза.

На рис. 21 приведена структурная схема аналого-цифрового преобразователя, работающего по принципу тройного токового интегрирования. Источники тока, ключи и счетчики у АЦП такие же, как и у ЦАП, только добавлены компараторы и усилители. Запомненное интегратором напряжение аналогового сигнала разряжается током с весом 2^{10} до тех пор, пока напряжение на выходе интегратора не станет

Рис. 21. АЦП с тройным токовым интегрированием

равным U_A. Время в течение этого периода подсчитывается 6-разрядным счетчиком. На следующем этапе запоминающий конденсатор разряжается посредством источника тока с весом 2^5 до U_B. И на последнем этапе оставшийся заряд на емкости интегратора разряжается самым "маленьким" током с весом 1 до нуля. В результате цифровой сигнал с выхода счетчиков становится значением отсчета ИКМ-сигнала.

Значения опорных напряжений U_A и U_B могут быть вычислены как

$$U_A \geqslant \frac{2^5 \cdot i_3 \cdot \tau}{C}; \quad U_B \geqslant \frac{2^5 \cdot i_2 \cdot \tau}{C},$$

где τ – период тактовой частоты; $U_C = 0$, C – значение емкости интегратора.

На рис.22 приведена зависимость коэффициента искажений от уровня входного сигнала.

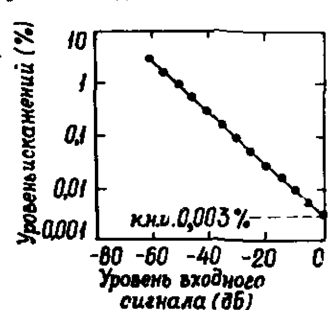


Рис.22. Зависимость уровня искажений от уровня входного сигнала АЦП

Для точной подстройки соотношения значений токов источников ЦАП и АЦП в микросхемы преобразователей встраивается малоразрядный ЦАП на основе матрицы R – 2R и программируемое постоянное запоминающее устройство (ПЗУ). При производстве микросхем АЦП и ЦАП производится их точная настройка путем записи в ПЗУ необходимых корректирующих данных, изменяющих с помощью внутреннего ЦАП соотношение токов источников.

Для снижения энергопотребления источники тока, компараторы, усилители, ключи, интегратор размещают в одной микросхеме, выполненной по биполярной технологии, а логическую часть преобразователя – счетчики, устройство управления и т.п. – в другой. Таким образом достигается оптимальное использование площади кристаллов микросхем и, как следствие, снижение стоимости.

ЦИФРО-АНАЛОГОВОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЗВУКОВОГО СИГНАЛА С ПЕРЕДИСКРЕТИЗАЦИЕЙ

Чтобы преобразовать сигнал с выхода ЦАП в аналоговый, его необходимо пропустить через ФНЧ с высокой крутизной среза. При наличии идеального усилителя мощности и идеальных акустических систем этого можно было бы не делать: фильтрация осуществлялась бы непосредственно слуховым аппаратом человека. В будущем, возможно, появятся цифровые акустические системы, выполняющие роль акустического ЦАП: при подаче на них цифрового кода на выходе системы непосредственно будет формироваться акустический сигнал. Подобные акустические цифровые преобразователи начинают использоваться в цифровых линиях телефонной связи. Проблема фильтрации при использовании таких преобразователей отпадает. Но сейчас при использовании аналоговых усилителей с ограниченной полосой пропускания и определенной нелинейностью передаточной характеристики, высокочастотные составляющие, содержащиеся в выходном сигнале ЦАП, при недостаточной фильтрации вызывают интермодуляционные искажения сигнала, заметные на слух. Подавление сигнала ФНЧ на частоте, равной половине частоты дискретизации, должно быть не менее 60 дБ. Крутизна ската ФНЧ получается при этом очень высокой. Например, при полосе пропускания 22 кГц и частоте дискретизации 48 кГц подавление сигнала фильтром на частоте 24 кГц должно составить 60 дБ, т.е. на участке 2 кГц коэффициент передачи фильтра должен уменьшиться в 1000 раз!

Крутизна спада АЧХ ФНЧ при подавлении в полосе пропускания 60 дБ составит 120 дБ/октаву. Для достижения таких значений крутизны

должны быть созданы ФНЧ 12-го порядка*). Возрастает число усилительных каскадов, используемых в ФНЧ, шумы и другие искажения сигнала. Фильтры высокого порядка трудоемки в настройке, требуют применения прецизионных пассивных компонентов и высококачественных усилительных схем. Чтобы получить приемлемые габариты ФНЧ, временную и температурную стабильности характеристик, необходимо изготавливать ФНЧ в виде гибридной микросхемы, которая оказывается достаточно дорогой. Но и это не главное. Фильтр высокого порядка имеет существенно нелинейную фазовую характеристику, что приводит к искажениям импульсных сигналов. Поскольку реальный звуковой сигнал имеет импульсный характер (наличие достаточно резких перепадов уровня: ударные, клавишные, шумоподобные звуки), то такой ФНЧ вносит заметные на слух искажения, проявляющиеся в потере "прозрачности" звучания.

Характер сигнала на выходе ФНЧ высокого порядка при подаче на его вход прямоугольного сигнала приведен на рис. 23.

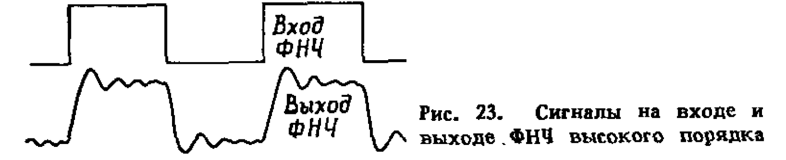


Рис. 23. Сигналы на входе и выходе ФНЧ высокого порядка

Эта проблема впервые возникла при создании компакт-дисковых цифровых проигрывателей и была решена путем применения цифровой фильтрации сигнала перед подачей его на ЦАП. Частота дискретизации на входе ЦАП увеличивается в несколько раз (обычно в 2–4 раза). Так как сигнал фильтруется цифровым фильтром, стоящим перед ЦАП, то теперь к аналоговому фильтру на выходе ЦАП предъявляются невысокие требования, как правило, становится достаточным применение ФНЧ (3–5)-го порядка с частотой среза 25–30 кГц, имеющего фазовую характеристику с хорошей линейностью и практически не искажающего импульсный сигнал. Цифровой фильтр, стоящий перед ЦАП, должен также иметь высокий порядок, но выполнить его с линейной фазовой характеристикой сравнительно просто. Рассмотрим подробнее принцип фильтрации с передискретизацией.

Повторим, что цифровой ИКМ-сигнал имеет периодический спектр: набор звуковых частот многократно повторяется с центрами на частотах

---

*) Порядок фильтра определяется числом его полюсов. Термин "полюс" взят из области математики (функции комплексной переменной), используемой для вывода соотношений при расчете частотных характеристик фильтров. Каждый полюс вносит в наклон ската ФНЧ примерно 6 дБ/октаву (для фильтров Чебышева и Кауэра это значение увеличивается). При построении активных RC-фильтров на одном усилительном каскаде (операционном усилителе) удается реализовать фильтр с порядком не выше 3.

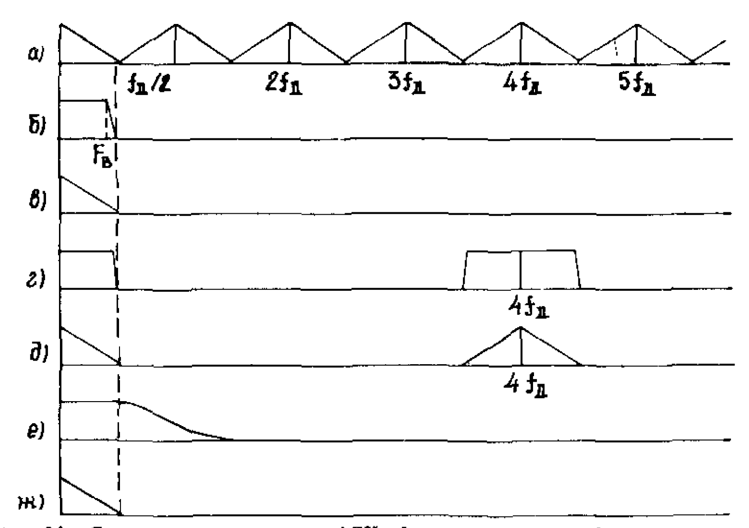


Рис.24. Спектры сигналов и АЧХ фильтров при цифро-аналоговом преобразовании с передискретизацией: *а)* спектр ИКМ-сигнала; б) АЧХ фильтра низких частот при преобразовании без передискретизации; *в)* спектр звукового сигнала после фильрации; *г)* АЧХ цифрового ФНЧ; *д)* спектр ИКМ-сигнала, прошедшего цифровой фильтр; *е)* АЧХ аналогового ФНЧ при преобразовании с передискретизацией; *ж)* спектр звукового сигнала на выходе системы

$f_д$, $2f_г$, $3f_д$ и т.д., где $f_д$ – частота дискретизации (рис.24,*а*). Преобразование ИКМ-сигнала в аналоговый заключается в удалении всех высокочастотных составляющих спектра цифрового сигнала, кроме самих звуковых частот. Именно для этой цели у аналогового ФНЧ должен быть крутой спад (рис.24,*б*). Удалить высокочастотные компоненты с помощью цифрового ФНЧ до ЦАП непросто. Дело в том, что АЧХ цифровых фильтров также периодична и повторяется с частотой дискретизации. Если цифровой ФНЧ будет работать при частоте дискретизации входных данных $f_д$, все высокочастотные компоненты *останутся неподавленными. Поэтому и применяется передискретизация* – увеличение частоты дискретизации с помощью специального устройства – интерполятора (его не следует путать с интерполятором, служащим для восстановления ошибочных значений ИКМ-сигнала, о котором будет говориться ниже). Интерполятор не в состоянии подавить ВЧ-компоненты спектра ИКМ-сигнала, он служит для обеспечения эффективной фильтрации ВЧ-компонент цифровым фильтром.

Если частота дискретизации увеличена, например, в 4 раза, цифровой ФНЧ, работающий на этой частоте, может эффективно вырезать спектральные компоненты, прилегающие к частотам $f_д$, $2f_д$, $3f_д$, $4f_д$ и т.д. АЧХ цифрового фильтра будет повторяться с периодичностью $4f_д$, и теперь неподавленными останутся спектры ИКМ-сигнала, примы-

кающие к частотам $4f_д$, $8f_д$ и т.д. Так как эти неподавленные компоненты находятся очень далеко от граничной частоты звукового спректра (рис.24,*г*), то они легко подавляются с помощью простого аналогового ФНЧ.

На практике интерполятор и цифровой фильтр часто реализуются в виде единого фильтра передискретизации.

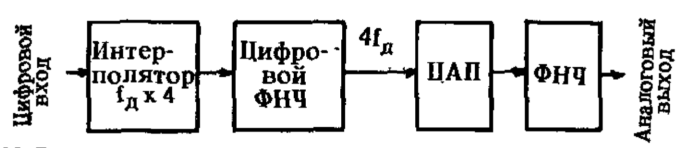


Рис.25. Блок-схема цифро-аналогового преобразования с четырехкратной передискретизацией

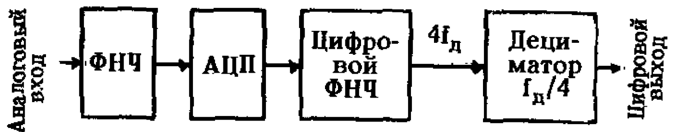


Рис.26. Блок-схема аналого-цифрового преобразования с четырехкратной субдискретизацией

Структурная схема цифро-аналогового преобразователя с передискретизацией изображена на рис. 25.

Недостаток передискретизации – необходимость использования более быстродействующих ЦАП. Например, для 4-кратной передискретизации и частоты $f_д$ = 48 кГц время установления выходного напряжения ЦАП не должно превышать 5 мкс.

Такая же проблема в связи с использованием ФНЧ для исключения наложений спектров стоит и при аналого-цифровом преобразовании. Решается она аналогичным образом, только при этом необходим АЦП, работающий на повышенной частоте субдискретизации. После АЦП ставится цифровой фильтр, осуществляющий фильтрацию сигнала, и дециматор, понижающий частоту субдискретизации до необходимого значения $f_д$ (рис.26). Чем больше частота работы АЦП, тем ниже требования к входному ФНЧ и выше качество преобразования.

ЦИФРОВОЙ МАГНИТОФОН

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

Если звуковой сигнал в аналоговом магнитофоне преобразуется в пространственное распределение намагниченности на ленте, то лента цифрового магнитофона хранит лишь двоичные символы, полученные в результате преобразования сигнала в последовательность чисел. При

правильном их воспроизведении звуковой сигнал может быть восстановлен без каких-либо искажений. Поэтому при цифровой магнитной записи исключается главное ограничение повышения качества звукозаписи – зависимость от свойств магнитной ленты и головки, шумов и других искажений, характерных для аналоговой записи, и определяется лишь параметрами АЦП и ЦАП. Временные искажения сигнала, вызванные детонацией, также устраняются, так как значения временных интервалов в ИКМ-сигнале известны. В итоге, звучание цифрового магнитофона, в общем случае, не отличается от звучания устройств, где АЦП и ЦАП соединены напрямую, без канала магнитной записи.

Для обеспечения устойчивости записанного на ленту цифрового сигнала к ошибкам, вызванным загрязнением магнитных головок, повреждением магнитного слоя ленты, шумами, рывками ленты в ЛПМ и т.п., используются принципы помехоустойчивого кодирования. К ИКМ-сигналу при записи добавляются дополнительные проверочные, или корректирующие, данные. При воспроизведении они используются специальной системой коррекции для обнаружения и исправления ошибок в цифровом сигнале. Процесс добавления к сигналу дополнительных данных носит название кодирования. Обнаружение и исправление ошибок называется декодированием.

Одиночная ошибка в кодовом слове после его преобразования в ЦАП вызывает такое искажение аналогового сигнала, которое может восприниматься на слух, как щелчок. Величина искажения и громкость щелчка зависят от веса искаженного разряда кодового слова. В цифровых системах звукопередачи принимаются меры для исключения или существенного уменьшения любых цифровых ошибок. Для их обнаружения и исправления применяют так называемые избыточные коды. Наиболее простым способом введения избыточности для обнаружения одиночных ошибок является такое кодирование цифрового слова, при котором количество единиц дополняется до нечетного числа. Для этого в кодовое слово вводится единица или нуль.

Пример кодирования 4-разрядного двоичного кода дополнением до нечета представлен в табл. 3.

Таблица 3

Исходное кодовое слово	000	001	010	011	100	101	110	111
Закодированное слово	1000	0001	0010	1011	0100	1101	1110	0111

Если при чтении информации было принято слово с четным количеством единиц, то принимается решение о том, что такой отсчет должен быть подвергнут коррекции.

Нетрудно заметить, что такое кодирование позволяет лишь обнаружить искажение одного из бит кодового слова. Правильно указать на искаженный бит и тем более исправить его невозможно.

На практике применяются значительно более сложные коды, которые позволяют обнаруживать ошибки любой кратности и исправлять искажения нескольких бит в принятом кодовом слове. Такие коды называются помехоустойчивыми. Одним из наиболее распространенных помехоустойчивых кодов является код Хэмминга. Для обнаружения и исправления одиночных ошибок, возникающих при передаче 16-разрядных слов, в передаваемое слово добавляются еще 6 бит, которые кодируются специальным образом. При этом имеется возможность обнаруживать все двукратные ошибки (искажение любых двух бит в 22-разрядном слове). Однако избыточность кода Хэмминга составляет 37,5 %.

Благодаря помехоустойчивому кодированию ИКМ-сигнал при каждом воспроизведении полностью очищается от ошибочных значений, и становится возможной многократная перезапись фонограмм без ухудшения качества.

При вопроизведении ИКМ-сигнала его значения предварительно запоминаются в устройстве восстановления временного масштаба. Затем они считываются в ЦАП с частотой дискретизации, задаваемой кварцевым генератором. Таким образом устраняются временные искажения, связанные с детонацией и дрейфом скорости.

Основные преимущества цифровой магнитной записи:

– возможность получения сколь угодно большого динамического диапазона и сколь угодно малых искажений сигнала;

– отсутствие детонации звука;

– возможность многократного копирования фонограмм без ухудшения качества;

– отсутствие модуляционных шумов и шума носителя;

– отсутствие искажений амплитудно-частотной характеристики при любых уровнях сигнала в пределах динамического и частотного диапазонов.

Однако необходимость записи длинных последовательностей двоичных сигналов, представляющих значения закодированного ИКМ-сигнала, требует очень широкой полосы частот записи, поскольку скорость потока двоичных символов при высокой частоте дискретизации и большой разрядности АЦП достигает значительной величины. Это требует размещения на пленке гораздо большего числа переходов намагниченности, чем при аналоговой записи. Только одно значение ИКМ-сигнала, вычисленное 16-разрядным АЦП, представляется последовательностью в шестнадцать единиц и нулей, которая записывается на ленту. За одну секунду таких последовательностей при частоте дискретизации 48 кГц должно записываться 48000. Для двухканальной стереозаписи скорость передачи данных составит:

$$v_{пер} = 2 \times 16 \times 48000 = 1{,}54 \text{ Мбит/с}.$$

После добавления проверочных данных помехоустойчивого кода скорость передачи возрастает примерно до 2,5 Мбит/с.

Если минимальная длина волны записи (λ) в обычном кассетном магнитофоне составляет 3 мкм, а интервал намагниченного участка, соответствующий одному биту, равен половине длины волны записи ($B = \lambda/2$), то для записи цифрового сигнала на две дорожки потребуется скорость движения ленты

$$v = \frac{\lambda \cdot v_{пер}}{2\,n_{дор}} = \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 2{,}5 \cdot 10^{6}}{2 \cdot 2} = 1{,}9 \text{ м/с.}$$

При этом время звучания обычной компакт-кассеты составит всего 1,5 минуты. Конечно, это совершенно неприемлемо, поскольку цифровой магнитофон должен, по меньшей мере, обеспечить одинаковый расход ленты по сравнению с аналоговым. Для этого, прежде всего, должна быть уменьшена минимальная длина волны записи, что требует применения более высококачественных лент и магнитных головок. Современные ленты (например, металлопорошковые) и магнитные головки на основе сендаста и феррита позволяют производить запись при минимальных длинах волн до 0,5 мкм.

Время звучания можно увеличить и другим способом: число *дорожек на ленте при цифровой записи может быть увеличено при* уменьшении их ширины по сравнению с дорожками аналоговой записи. Такая возможность открывается в связи с особенностями записи двоичных сигналов, имеющих всего два состояния – *"0" и "1". При этом* снимаются проблемы обеспечения линейности передаточной характеристики канала магнитной записи, поскольку необходимо определить не точное значение амплитуды воспроизводимого сигнала, а дать заключение об одном из двух ее крайних значений. При этом значительно упрощается канал записи. Усилитель записи должен обеспечить только переключение направления тока записи в головке в соответствии с двоичным символом (0 или 1) на входе. Так как нет необходимости точно воспроизводить формулу импульсов при записи, канал цифровой магнитной записи более устойчив к изменениям параметров ленты, тока записи и т.п., чем канал аналоговой магнитной записи. И при этом, что особенно важно, не требуется большого отношения сигнал-шум. При цифровой записи это отношение определяет лишь правильность восстановления двоичного символа, а не динамический диапазон, как в аналоговой звукозаписи. Для достижения приемлемой вероятности ошибок в канале записи, при которой на выходе системы коррекции обеспечивается безошибочное воспроизведение, достаточно иметь отношение сигнал-шум 20–30 дБ. В результате становится возможным уменьшение ширины дорожек при цифровой магнитной записи до 10–20 мкм, что обеспечивает повышение поверхностной плотности записи. *Дополнительное преимущество прямого способа записи* – отсутствие специальной стирающей головки. Стирание предыдущего сигнала происходит непосредственно сигналом новой записи.

Остановимся кратко на одной важной особенности цифрового сигнала.

Перед записью на ленту цифровой сигнал преобразуется с помощью так называемого канального кодирования, которое для цифровой записи в какой-то степени аналогично введению предыскажений в записываемый сигнал при аналоговой записи.

Для чего применяется канальное кодирование?

Как известно, канал магнитной записи не способен передавать постоянную составляющую сигнала. Магнитная головка дифференцирует сигнал намагниченности ленты, реагируя только на изменения намагниченности. Чем чаще происходят эти изменения (чем выше частота записанного сигнала или больше скорость движения ленты), тем больше уровень сигнала с головки воспроизведения. Если на ленте записан сигнал с неизменным значением намагниченности, выходной сигнал с головки равен нулю. Поэтому длинные серии единиц или нулей, записанные на ленте, приводят к невозможности правильного восстановления цифрового сигнала. На рис.27 приведен типичный отклик головки воспроизведения на записанный цифровой сигнал. С помощью канального кодирования продолжительные последовательности единиц или нулей преобразуются в двоичный сигнал, который достаточно часто меняет свое значение. Чем чаще происходит смена состояния сигнала от "1" к "0" и наоборот, тем уже полоса частот, занимаемая цифровым сигналом (за счет уменьшения низкочастотных составляющих), тем благоприятнее условия для правильного восстановления цифрового сигнала при воспроизведении.

Вторая цель применения канальных кодов – придание записываемому сигналу свойства самосинхронизации для обеспечения правильного определения тактового интервала (интервал длительности

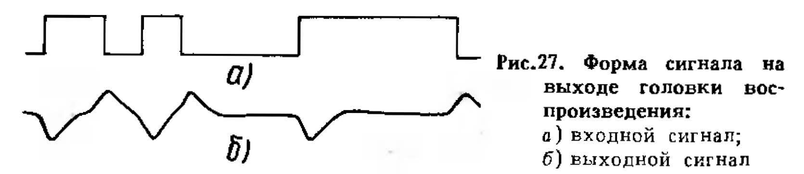


Рис.27. Форма сигнала на выходе головки воспроизведения:
а) входной сигнал;
б) выходной сигнал

одного бита) в условиях зашумленности, паразитной амплитудной и частотной модуляций воспроизводимого сигала. Для того, чтобы узнать, сколько в данной посылке сигнала, воспроизведенного с ленты, содержится нулей и единиц, необходимо, зная тактовую частоту, с которой записывался сигнал, сосчитать количество "1" или "0". В некоторых случаях при невысокой плотности записи для этого используют дополнительную дорожку, на которой параллельно с основными данными записывается тактовая частота. Но при этом, во-первых, нерационально расходуется лента на дополнительную дорожку и, во-вторых, при малых длинах волн записи возможно смещение тактовых

импульсов относительно тактовых интервалов сигнала даже из-за небольших перекосов и рывков ленты при ее движении в ЛПМ. В высокоплотной цифровой магнитной записи используются свойства самосинхронизации канальных кодов: с помощью специальной схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) при воспроизведении вырабатывается тактовая частота, соответствующая тактовым интервалам воспроизводимого цифрового сигнала. Схема ФАПЧ следит за временными изменениями воспроизводимого сигнала и изменяет тактовую частоту таким образом, чтобы обеспечить правильное восстановление значений ИКМ-сигнала. Рис. 28 поясняет принцип восстановления данных с помощью схемы ФАПЧ.

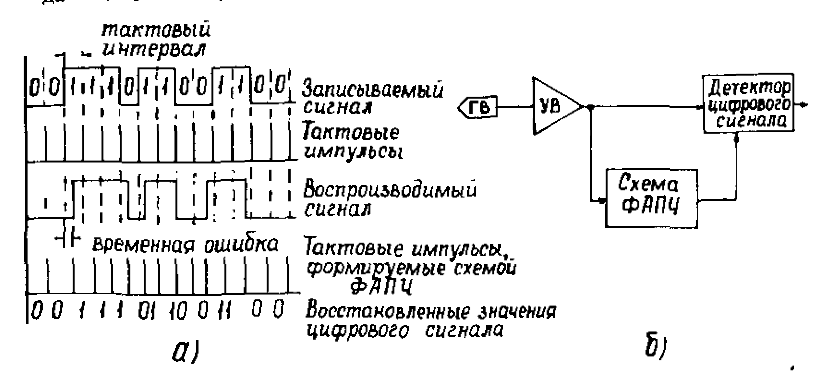


Рис.28. Восстановление данных с помощью схемы ФАПЧ:
а) временная диаграмма; *б*) блок-схема системы ФАПЧ

Широко используется в цифровом магнитофоне такое достоинство ИКМ-сигнала, как возможность произвольного изменения его временного масштаба при записи на ленту. Перед записью ИКМ-сигнал, который условно разделяется на фрагменты определенной длины, как правило, предварительно запоминается в блоке полупроводниковой памяти – оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ). Запись в ОЗУ происходит с частотой дискретизации, а считывание данных при записи на ленту – с более высокой частотой. В результате на временном интервале блока данных появляется свободное место, которое можно использовать для записи вместе со сжатым фрагментом ИКМ-сигнала дополнительных данных. Прежде всего, это данные помехоустойчивого канала, используемые при защите значений ИКМ-сигнала от случайных ошибок. Кроме того, записываются специальные маркерные сигналы начала каждого блока данных, сигналы для системы автоматического регулирования двигателей ЛПМ, дополнительная информация, с помощью которой можно отыскать нужный фрагмент записи и т.п.

При воспроизведении ОЗУ используется для восстановления временного масштаба ИКМ-сигнала. Сигнал, воспроизводимый с ленты,

запоминается в ОЗУ, а затем считывается из ОЗУ с частотой дискретизации и поступает на вход ЦАП. Так как частота дискретизации при этом задается кварцевым генератором, детонация практически отсутствует. Процесс преобразования временного масштаба ИКМ-сигнала при записи-воспроизведении показан на рис. 29.

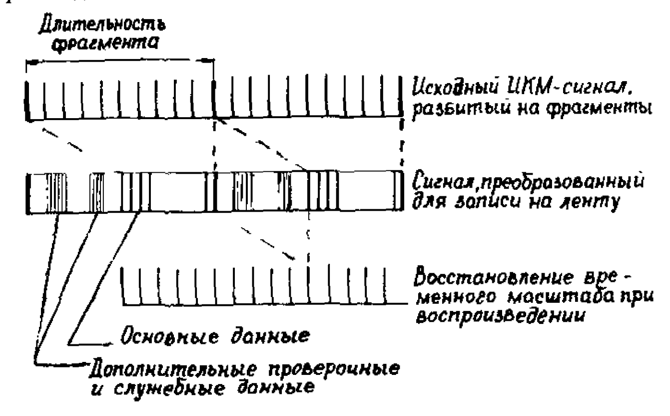


Рис.29. Процесс преобразования временного масштаба ИКМ-сигнала

Часто совместно с преобразованием временного масштаба ИКМ-сигнала при записи-воспроизведении ОЗУ выполняет операции перемежения-деперемежения значений ИКМ-сигнала. При записи на ленту отсчеты ИКМ-сигнала размещаются не в естественном порядке, а вразброс, по определенному алгоритму. При воспроизведении осуществляется обратное преобразование (деперемежение) и подача значений отсчетов в ЦАП в естественном порядке. Перемежение-деперемежение необходимо для защиты значений ИКМ-сигнала от пакетных ошибок (выпадений), которые не могут быть исправлены с помощью помехоустойчивого кода, исправляющего обычно не более 2–3 ошибок в кодовом слове. Дальнейшее наращивание исправляющей способности кода приводит к сильному возрастанию объема дополнительных проверочных данных, которые необходимо записывать вместе с ИКМ-сигналом. Кроме случайных ошибок, приводящих к потере 1–2 символов, для магнитной записи характерны упомянутые пакетные ошибки, когда искажается сразу целый ряд символов цифрового сигнала. Это происходит из-за повреждения слоя ленты на каком-либо участке или загрязнения головки и ленты, приводящих к потере сигнала. Пакетные ошибки могут достигать длины до нескольких тысяч бит. С помощью перемежения такие пакетные ошибки при деперемежении преобразуются в одиночные (двойные) ошибки отдельных кодовых слов, которые могут быть исправлены помехоустойчивым кодом. Пакет ошибок как бы растягивается на большее количество данных. Интервал перемежения (расстояние, на которое разносятся соседние символы,) должен быть

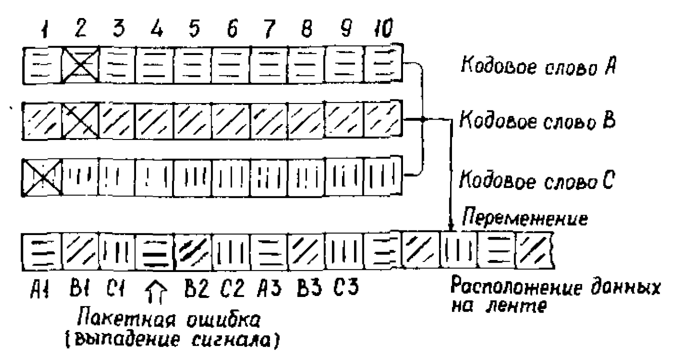


Рис.30. Процесс перемежения кодовых слов для защиты от выпадений

больше длины ожидаемого выпадения. Техника перемежения-деперемежения позволяет эффективно бороться с выпадениями и значительно упрощает реализацию схем кодирования-декодирования. Процесс перемежения-деперемежения показан на рис. 30.

ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Обобщенная структурная схема цифрового магнитофона изображена на рис. 31.

Аналоговый звуковой сигнал через фильтр низких частот (ФНЧ) поступает на вход АЦП, где преобразуется в ИКМ-сигнал. Количество каналов аналого-цифрового преобразования может быть различным в зависимости от назначения магнитофона. Для бытового магнитофона оно равняется двум, для студийного многоканального магнитофона, записывающего партии отдельных инструментов и исполнителей по отдельным каналам – до 30. Отдельные каналы могут смешиваться в общий цифровой канал с помощью временного уплотнения. При воспроизведении осуществляется операция демультиплексирования, которая производит разделение общего потока на отдельные каналы. С выхода мультиплексора ИКМ-сигнал поступает на вход схемы помехоустойчивого кодирования, которая формирует дополнительные проверочные данные. Цифровой сигнал с проверочными данными запоминается в ОЗУ. При считывании из ОЗУ происходит изменение временного масштаба ИКМ-сигнала и перемежение его отсчетов. Данные из ОЗУ поступают на вход модулятора канального кода, преобразующего цифровой двоичный сигнал в соответствии с алгоритмом канального кодирования. Кроме проверочных данных к сигналу перед записью на ленту добавляются дополнительные служебные данные, которые могут содержать информацию о параметрах записи (частота дискретизации, число разрядов квантования), служебные сигналы для обеспечения надежного функционирования ФАПЧ и систем авторегулирования магнитофона. С помощью

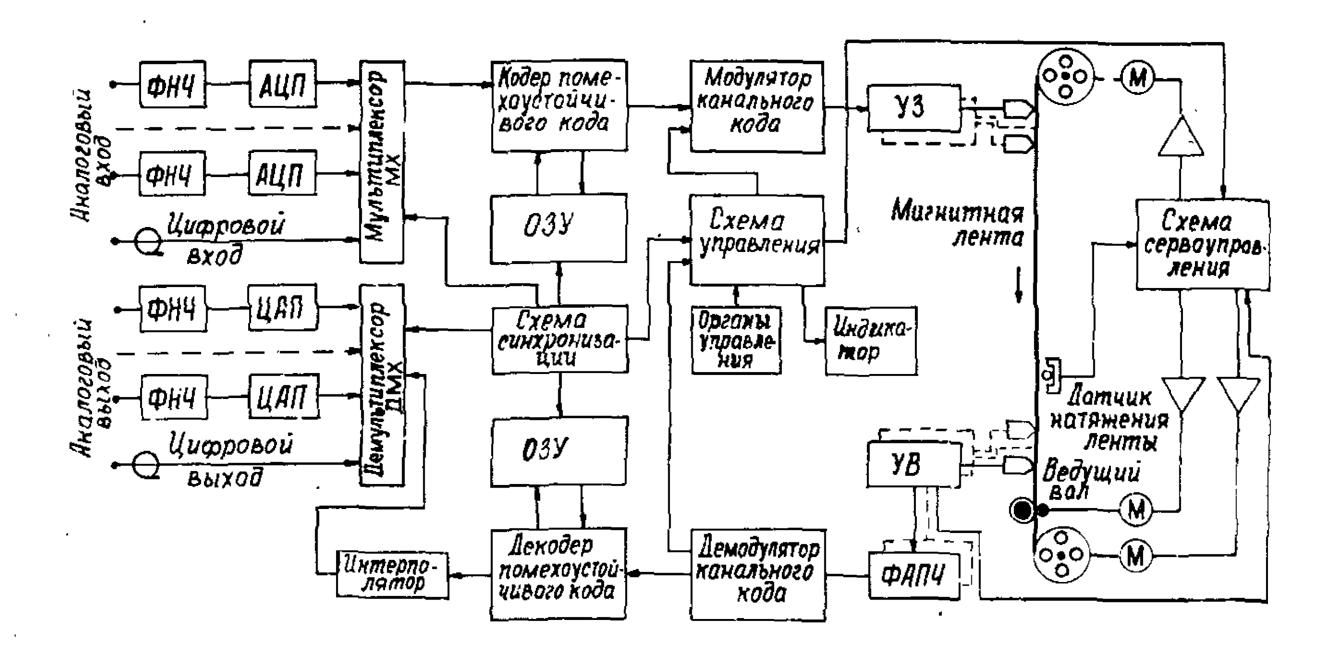


Рис.31. Структурная схема цифрового магнитофона

усилителя записи сформированный двоичный сигнал записывается на ленту.

При воспроизведении сигнал с выхода магнитной головки усиливается и превращается в прямоугольный бинарный сигнал. С помощью схемы ФАПЧ бинарный сигнал преобразуется в последовательность из нулей и единиц. Демодулятор канального кода восстанавливает закодированный сигнал в исходный ИКМ-сигнал. Дополнительные служебные данные отделяются от основного сигнала и поступают в схему управления магнитофона и систему сервоуправления. С выхода канального демодулятора цифровые данные поступают в ОЗУ. При считывании данных из ОЗУ осуществляется операция деперемежения данных и восстановление временного масштаба ИКМ-сигнала. Декодер помехоустойчивого кода обнаруживает и исправляет ошибки, возникшие в процессе записи-воспроизведения, после чего отсчеты ИКМ-сигнала поступают в ЦАП, где совместно с ФНЧ ведется восстановление аналогового звукового сигнала.

Управление и синхронизация работы всех устройств магнитофона осуществляется с помощью специальной схемы, основу которой, как правило, составляет небольшая микроЭВМ. Информация о дополнительных данных используется схемой управления для установки необходимого режима работы магнитофона. Для цифрового магнитофона, работающего в нескольких режимах с разными частотами дискретизации, схема управленья может автоматически устанавливать нужный режим воспроизведения. Дополнительная сервисная информация о времени звучания, порядковом номере фрагмента записи может использоваться для точного поиска нужного участка записи,редактирования и т.д. Для осуществления электронного монтажа на ленте может записываться специальной адресно-временной код, что позволяет с помощью специального электронного устройства формировать требуемую программу без разрезания и склеивания лент. Схема управления также формирует команды управления ЛПМ магнитофона в ответ на нажатие соответствующих кнопок.

Двигателями и электромагнитами ЛПМ управляет схема сервоуправления, обеспечивающая постоянное натяжение ленты во всех режимах работы, поддержание постоянства средней скорости ленты и некоторые другие функции, зависящие от конкретного построения тракта движения цифрового магнитофона.

Кроме аналоговых входов и выходов цифровой магнитофон может иметь и цифровые входы-выходы. Это позволяет, минуя стадию цифроаналогового и аналого-цифрового преобразований, производить так называемую цифро-цифровую перезапись фонограмм с одного магнитофона на другой.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНИКИ ЗАПИСИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ НА МАГНИТНУЮ ЛЕНТУ

Как отмечалось ранее, цифровой сигнал, представляющий в ИКМ-форме звуковые сигналы двух стереоканалов, имеет скорость передачи до 2,5 Мбит/с. Спектр частот полного цифрового сигнала с дополнительными служебными данными, промодулированного с помощью канального кода, достигает 4–6 МГц. Чтобы записать такой сигнал на ленту, требуется скорость движения ленты относительно головки до 3–5 м/с.

Для уменьшения интенсивности цифрового потока применяются многодорожечные блоки головок. При этом скорость передачи данных снижается пропорционально количеству дорожек на ленте, что приводит к уменьшению требуемой полосы частот записи и дает возможность уменьшить скорость движения ленты. Если использовать, например, 20-дорожечный блок головок, то скорость движения ленты должна составлять 15–25 см/с

Цифровые магнитофоны, построенные по такому принципу, имеют неподвижный блок головок, мимо которого протягивается лента (рис.32). Достоинство такой схемы построения – малый износ ленты и головок и простота ЛПМ с минимальным количеством движущихся узлов. К недостаткам следует отнести сложность изготовления блоков магнитных головок и увеличенный объем электронных устройств. Магнитофон должен иметь множество (по числу дорожек) усилителей записи-воспроизведения и, возможно, канальных модуляторов-демодуляторов со схемами ФАПЧ. Необходимо, особенно в случае высокоплотной записи, принимать особые меры по нейтрализации временных рассогласований цифровых сигналов разных дорожек, вызываемых даже небольшими перекосами ленты относительно блока головок.

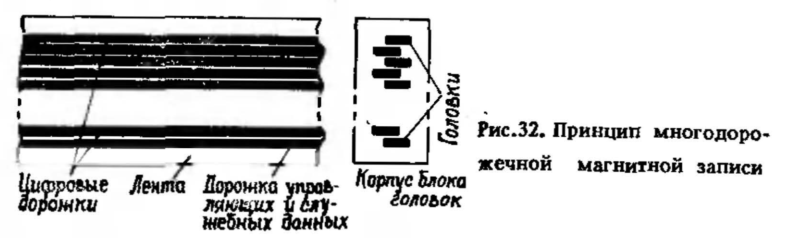


Рис.32. Принцип многодорожечной магнитной записи

Другой способ записи широкополосного цифрового сигнала на ленту состоит в реализации требуемой высокой скорости движения ленты относительно головки. Чтобы достичь желаемого результата при малом расходе ленты, используются головки, установленные на вращающемся барабане. В зависимости от расположения вращающегося барабана с головками относительно движущейся ленты возможны поперечно-строчная (дорожки записи располагаются под прямым углом к краю

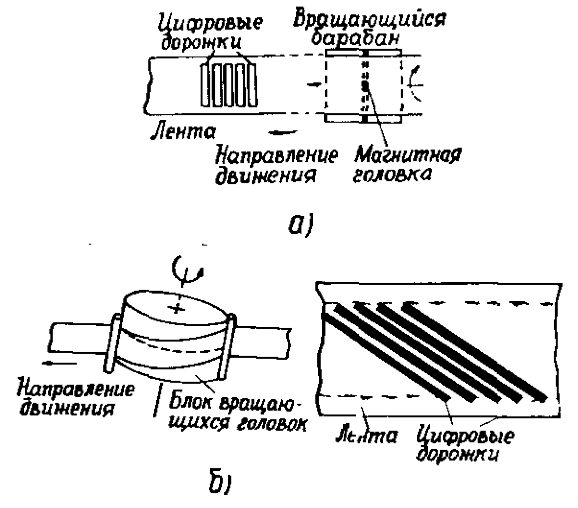


Рис.33. Принцип записи вращающимися магнитными головками:
а) поперечно-строчная запись; *б*) наклонно-строчная запись

ленты) и наклонно-строчная (дорожки располагаются под острым углом к краю ленты) записи. Такие принципы впервые были использованы для видеозаписи. Поперечно-строчный формат и сейчас продолжает использоваться в профессиональных студийных видеомагнитофонах. Наклонно-строчный формат широко применяется как в профессиональной, так и в бытовой видеоаппаратуре (рис.33). При небольших линейных скоростях транспортирования ленты (2–5 см/с) такие видеомагнитофоны имеют большую относительную скорость головка-лента (5–6 м/с и более), что позволяет производить запись сигналов с полосой до 5 МГц при отношении сигнал-шум до 40 дБ. Первые цифровые магнитофоны для записи звука были сделаны именно на основе видеомагнитофонов.

Одно из главных достоинств техники записи вращающимися головками – возможность достижения большей плотности по сравнению с продольной многодорожечной записью. В случае записи многодорожечным блоком головок между дорожками записи необходимо иметь защитные интервалы шириной не менее 10–15% от ширины дорожки записи, которые служат для исключения взаимовлияния каналов друг на друга, порождаемого смещением головок относительно дорожек записи, а также эффектом бокового считывания, заключающемся в том, что головка может считывать сигналы с участка более широкого, чем длина зазора. В результате поверхность магнитной ленты не может быть полностью использована для записи.

При использовании так называемой азимутальной наклонно-строчной записи запись наклонных строчек производится без промежутков между ними, вплотную. Отсутствие влияния соседних дорожек

на воспроизводимый сигнал обеспечивается использованием двух головок с взаимно-перекошенными зазорами. Угол наклона (азимут) одной из головок составляет, например, +6°, а драгой – –6°. Поэтому магнитные штрихи, записываемые головками, оказываются на соседних строчках записи наклонными под углом относительно друг друга. Магнитная головка с наклоном рабочего зазора реагирует при этом только на штрихи, наклон которых совпадает с наклоном зазора. При воспроизведении головка может следовать по всей дорожке записи с некоторой ошибкой – захватываемые с соседней дорожки сигналы подавляются (рис.34). Защитный эффект азимутальной записи усиливается с ростом частоты записанного сигнала. Для длинноволновых сигналов он выражен слабее. Этот эффект хорошо известен любителям магнитной записи: при неправильной установке угла наклона головки воспроизведения снижается уровень воспроизведения высоких частот фонограммы, в то время как низкие и средние частоты воспроизводятся достаточно хорошо.

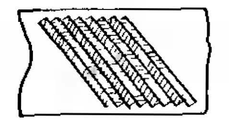




Рис.34. Расположение цифровых дорожек на ленте при азимутальной наклонно-строчной записи

Однако выигрыш в плотности порождает и ряд трудностей. Большая скорость движения ленты относительно головки в магнитофонах с вращающимися головками приводит к более быстрому износу головки, ленты, вращающегося барабана. ЛПМ такого магнитофона сложнее, чем магнитофона со стационарной головкой, требуется более высокая точность обработки его деталей. Необходима также специальная сервосистема, обеспечивающая правильное следование головок по дорожкам записи.

Выбор той или иной структуры цифрового магнитофона зависит от сферы применения технических требований к параметрам, допустимой стоимости одного часа записи, требуемой длительности записи, ограничений по размерам и многим другим факторам.

ЦИФРОВОЙ МАГНИТОФОН С ВРАЩАЮЩИМИСЯ ГОЛОВКАМИ

ОСНОВНЫЕ КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Появление на коммерческом рынке DAT-магнитофонов открыло новую эру звукозаписи. Причем наиболее жизнеспособным оказался магнитофон с вращающимися головками (формата R-DAT). С 1987 года многие фирмы Японии производят цифровые магнитофоны этого класса.

Благодаря применению наклонно-строчной записи без защитных промежутков R-DAT обладает наибольшей поверхностной плотностью записи на единицу поверхности – 17,7 миллионов бит на квадратный сантиметр, что почти на порядок превышает плотность записи в системе S-DAT (со стационарными головками). Кассета R-DAT меньше кассеты S-DAT и обеспечивает большую продолжительность записи (2 часа против 90 минут). Качество звучания обеих систем идентично и оценивается очень высоко.

Основные характеристики цифрового магнитофона в сравнении с параметрами аналоговых высококлассных кассетных дек, использующих компакт-кассету, приведены в табл. 4.

Частотные характеристики DAT-магнитофона "плоские" при любом уровне записываемого сигнала, что выгодно отличает его от аналоговых магнитофонов, АЧХ которых имеет значительный спад на высоких частотах при больших уровнях сигналов. Цифровой магнитофон практически свободен от детонации – уровень ее находится ниже пределов измерения. Отсутствует шум ленты, модуляционные шумы, копир-эффект, перекрестные искажения. Разделение стереоканалов практически идеальное и достигает 90 дБ.

Таблица 4

Технические характеристики	Цифровой магнитофон	Аналоговый магнитофон
Полоса записываемых частот, Гц	2–22000	25–20000 на металлопорошковой ленте
Динамический диапазон, дБ	96	50–60
Нелинейные искажения, %	0,005	0,3–0,5
Неравномерность АЧХ, дБ	0,5	3
Коэффициент детонации, %	0	0,02

С аналоговой записью на компакт-кассету R-DAT-магнитофон объединяет, пожалуй, только одно – используется магнитная лента такой же ширина – 3,81 мм, хотя сама лента, конечно, имеет значительно лучшие характеристики. Для R-DAT применяются металлопорошковые

ленты с большой коэрцитивной силой и остаточной магнитной индукцией, позволяющие уменьшить ширину наклонных дорожек на ленте до 13,6 мкм. Для сравнения заметим, что эта величина составляет 1/5 часть диаметра человеческого волоса, тогда как ширина дорожек на ленте в компакт-кассете составляет 600 мкм.

Очень важное достоинство R-DAT-магнитофона – малый расход ленты. Линейная скорость движения ленты составляет 8,15 мм/с, что почти в 6 раз меньше скорости обычного магнитофона (47,6 мм/с). Поэтому для записи одного и того же фрагмента требуется 1/3 длины ленты (с учетом двойной дорожки), какая была бы затрачена при записи на компакт-кассету.

Еще одно преимущество новых магнитофонов – возможность быстрого поиска нужного фрагмента записи. Скорость перемотки ленты в режиме поиска превышает скорость воспроизведения более чем в 200 раз, и это в 10 раз повышает скорость поиска по сравнению с аналоговыми аппаратами. Двухчасовая кассета DAT полностью перематывается за 40 секунд. Имеются модели, где скорость перемотки доведена до 300-кратного превышения скорости воспроизведения. Поиск нужного участка ведется с помощью специальных данных, записанных на ленту вместе с программой. Эти данные включают в себя информацию о номере фрагмента, времени его исполнения, общем времени звучания с начала записи и другие сведения. Эта информация обычно выводится на табло индикатора магнитофона. Практически все выпускаемые R-DAT-магнитофоны снабжены, кроме обычных аналоговых, еще и цифровыми входами-выходами. Это позволяет производить цифро-цифровую перезапись с магнитофона на магнитофон без какой-либо потери качества.

ФОРМАТ ЗАПИСИ НА ЛЕНТУ

Запись на ленту в R-DAT-магнитофоне осуществляется с помощью двух головок, размещенных под углом 180° на барабане блока вращающихся головок (БВГ). Движущаяся лента охватывает цилиндр БВГ под определенным углом таким образом, что магнитные головки, закрепленные на вращающейся части БВГ, просматривают под острым углом поверхность ленты, образуя наклонные строчки-дорожки записи. Схематично тракт ЛПМ R-DAT-магнитофона показан на рис. 35.

Головки вращаются со скоростью 2000 об/мин, и хотя скорость перемещения составляет всего 8,15 мм/с, скорость движения головки относительно ленты составляет 3,133 м/с.

Угол охвата лентой вращающегося барабана меньше, чем в видеомагнитофонах и составляет 90° (при диаметре БВГ 30 мм). Угол охвата в бытовых видеомагнитофонах – 180°. Малый угол охвата позволяет уменьшить давление ленты на цилиндр БВГ и головки. Это уменьшает износ, а также дает возможность реализовать высокие скорости перемотки ленты без отвода ее от барабана. Благодаря небольшому углу

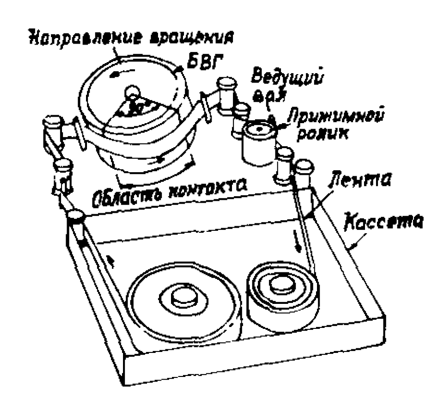


Рис.35. Тракт ЛПМ R-DAT-магнитофона

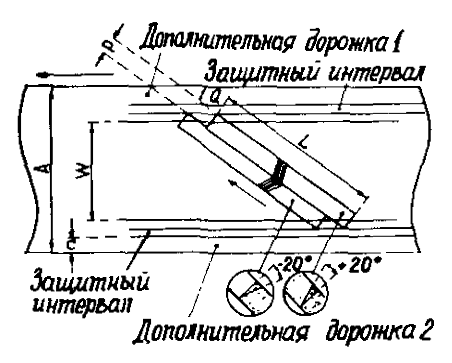


Рис.36. Формат записи на ленту (A–ширина ленты–3,81 мм; W–эффективная ширина записи–2,613 мм; L–длина дорожки записи–23,501 мм; P–ширина дорожки записи–13,591 мкм; Q–угол наклона дорожки–6°22′59,5″; C–ширина дополнительных дорожек–0,4 мм)

охвата механизм зарядки ленты в ЛПМ R-DAT-магнитофона значительно проще, чем в видеомагнитофоне. Формат записи на ленту приведен на рис. 36.

Для записи без защитных промежутков между дорожками записи применяется упоминавшаяся выше азимутальная запись. Рабочие зазоры головок имеют угол наклона ±20°. Ширина магнитных головок в R-DAT-магнитофоне выбрана в 1,5 раза больше ширины дорожки для облегчения работы системы автотрекинга (автоматического поиска дорожки), обеспечивающей следование головок по траекториям дорожек записи. Поэтому при воспроизведении головки захватывают и часть соседних дорожек, но благодаря разным углам наклона зазоров головок и зон намагниченности соседних дорожек мешающие сигналы подавляются. Ширина дорожки записи определяется величиной скорости движения ленты. Чем быстрее протягивается лента, тем шире будут дорожки записи. По мере увеличения скорости ленты ширина дорожек станет равной ширине головок, и между дорожками появятся промежутки. Если же уменьшить скорость движения ленты, дорожки будут сужаться, и в пределе, при остановке ленты головки будут сканировать по одной дорожке.

Вычислим для примера ширину дорожки в R-DAT формате. Время, за которое блок головок совершает один оборот при скорости вращения 2000 об/мин, или 33,3 об/с, равняется 30 мс. Время, требующееся для подхода к ленте второй головки после начала сканирования по дорожке первой – 15 мс. За это время при линейной скорости 8,15 мм/с лента продвинется на величину L = 8,15 мм/с · 15 мс = 122,25 мкм. Угол наклона дорожки к краю ленты составляет для R-DAT L = 6°22′59,5″.

Из рис.37 следует, что ширина дорожки записи может быть вычислена как d = L · sin £ = 13,591 мкм.

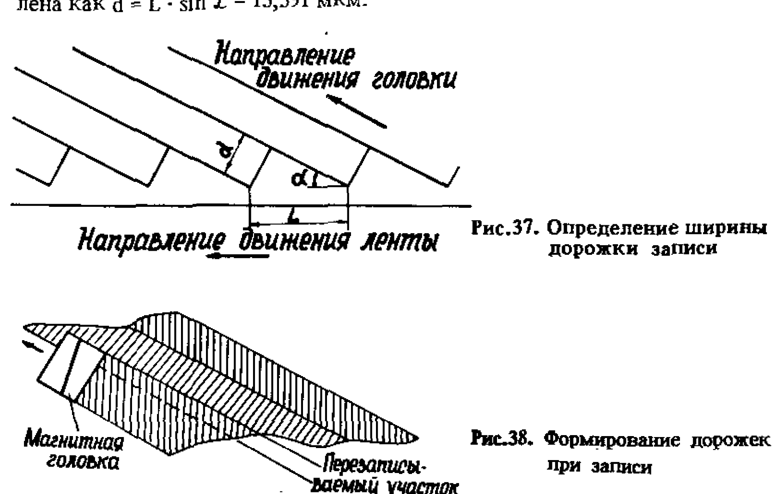


Рис.37. Определение ширины дорожки записи

Рис.38. Формирование дорожек при записи

При записи участок соседней дорожки, захватываемый головкой, сканирующей в данный момент по ленте, перезаписывается полем сигнала этой головки (рис.38).

Эффективная ширина ленты, где располагается зона записи дорожек, составляет 2,613 мм. Области ленты, прилегающие к краям, для записи основного сигнала не используются из-за вероятности повреждения края ленты. Форматом предусмотрены, пока как резервные, две продольные дорожки, прилегающие к краям ленты, шириной 0,4 мм.

В основном варианте реализации формата записи стандарта R-DAT применяется БВГ с диаметром 30 мм и углом охвата лентой 90°. При наличии двух головок, установленных на БВГ под углом 180°, 50 процентов времени ни одна из головок не касается ленты, а значит, отсутствует сигнал на выходе при воспроизведении. Вспомним, что цифровой сигнал подвергается временному сжатию перед его записью на ленту, а при воспроизведении осуществляется обратный процесс: сжатый сигнал растягивается до первоначального масштаба. Промежутки времени, образующиеся между циклами контакта головок с лентой, используются для необходимой обработки сигнала. Такое решение упрощает аппаратуру.

Стандартом предусмотрены и другие варианты реализации формата записи. Возможно применение БВГ с диаметром 15 мм и углом охвата 180°, БВГ с диаметром 60 мм и углом охвата лентой 45°. При этом скорость вращения БВГ и число головок остаются такими же. Изменяется время контакта головок с лентой, относительная скорость и временные соотношения по отношению к варианту БВГ с диаметром 30 мм. Вариант БВГ с диаметром 15 мм может использоваться для уменьшения размеров цифрового магнитофона в переносных малогабаритных моделях. Вариант БВГ с диаметром 60 мм, благодаря малому углу охвата, может использоваться в стационарных аппаратах с повышенной скоростью поиска. Для реализации этих вариантов требуется переработка схемных решений, отличающихся от основного варианта, но при этом обеспечивающих взаимозаменяемость записей.

Поскольку вариант с БВГ диаметром 30 мм и углом охвата 90° в стандарте на R-DAT как основной, в дальнейшем все временные соотношения, значения частот сигнала и т.п. будут приводиться для этого варианта.

Кроме режима записи-воспроизведения с линейной скоростью 8,15 мм/с и скоростью вращения БВГ 2000 об/мин стандартом предусмотрены еще два режима работы R-DAT-магнитофона. Первый, обязательный, – это режим широкой дорожки, предназначенный только для воспроизведения предварительно записанных в студиях звукозаписи кассет. При этом может быть использована более дешевая оксидная лента. Линейная скорость в этом режиме в 1,5 раза выше, чем в обычном – 12,25 мм/с. Соответственно ширина дорожки записи увеличится до 20,41 мкм, а время звучания сокращается до 80 минут. Второй, необязательный, – режим долгоиграния, позволяющий при некотором снижении качества звучания записать на двухчасовой кассете 4-часовую программу. Диапазон частот записи уменьшается до 14,5 кГц, коэффициент искажений увеличивается до 0,025% при сохранении динамического диапазона. В этом режиме линейная скорость уменьшается до 4,075 мм/с с одновременным уменьшением скорости вращения БВГ до 1000 об/мин. Некоторые параметры этих режимов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Параметр \ Режим работы	Основной	Долгоиграющий	Широкая дорожка
Ширина ленты, мм	3,81	3,81	3,81
Ширина дорожки, мкм	13,591	13,591	20,41
Скорость движения дорожки, мм/с	8,15	4,075	12,25
Угол наклона дорожки	6°22′59,5″	6°22′59,5″	6°23′29,4″
Угол наклона зазоров	±20°	±20°	±20°
Скорость вращения БВГ, об/мин	2000	1000	2000
Эффективная ширина записи, мм	2,613	2,613	2,613
Время записи (для ленты 13 мкм), мин	120	240	80

Кассета R-DAT имеет размеры 73x54x10,5 мм. На рис.39 кассета R-DAT показана в сравнении с различными типами существующих кассет. Внешний вид кассеты R-DAT и она же в разобранном виде показаны на рис. 40, 41.

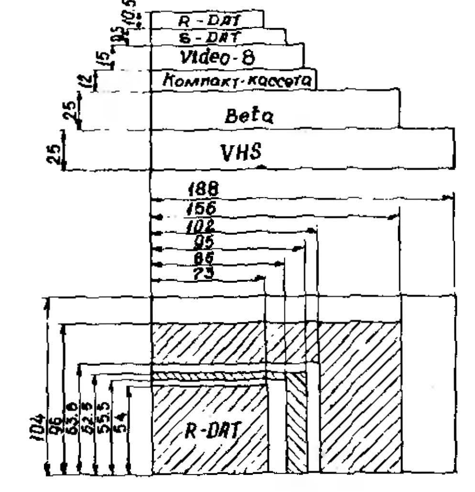


Рис.39. Сравнение R-DAT-кассеты с другими типами

В нерабочем состоянии лента в кассете хорошо защищена от внешних воздействий. Небольшой размер в совокупности с хорошей защищенностью ленты обеспечивает большое удобство и надежность эксплуатации DAT-кассеты по сравнению с привычной компакт-кассетой. Окно, обеспечивающее доступ к рабочей поверхности ленты, закрывается поворачивающейся крышкой так же, как это сделано в видеокассете. В нижней части кассеты отверстия подкатушечных узлов и прорезь, обеспечивающая размещение стоек, заправляющих ленту в ЛПМ, в нерабочем состоянии закрываются сдвигающейся плоской панелью. Так обеспечивается защита ленты от загрязнения.

Сдвигающаяся панель не дает крышке, закрывающей ленту, открываться вне магнитофона. Сама эта панель запирается в нерабочем состоянии с помощью двух специальных защелок, расположенных в нижней части корпуса кассеты. В нерабочем состоянии блокируются и сердечники катушек кассеты с помощью специального рычага, связанного с крышкой, закрывающей ленту.

При установке кассеты в магнитофон выступы на нижней поверхности кассетоприемника входят в канавки сдвигающейся панели и отпирают защелки, блокирующие эту панель. При вдвигании кассеты в кассетоприемник панель сдвигается назад, открывая прорезь для доступа

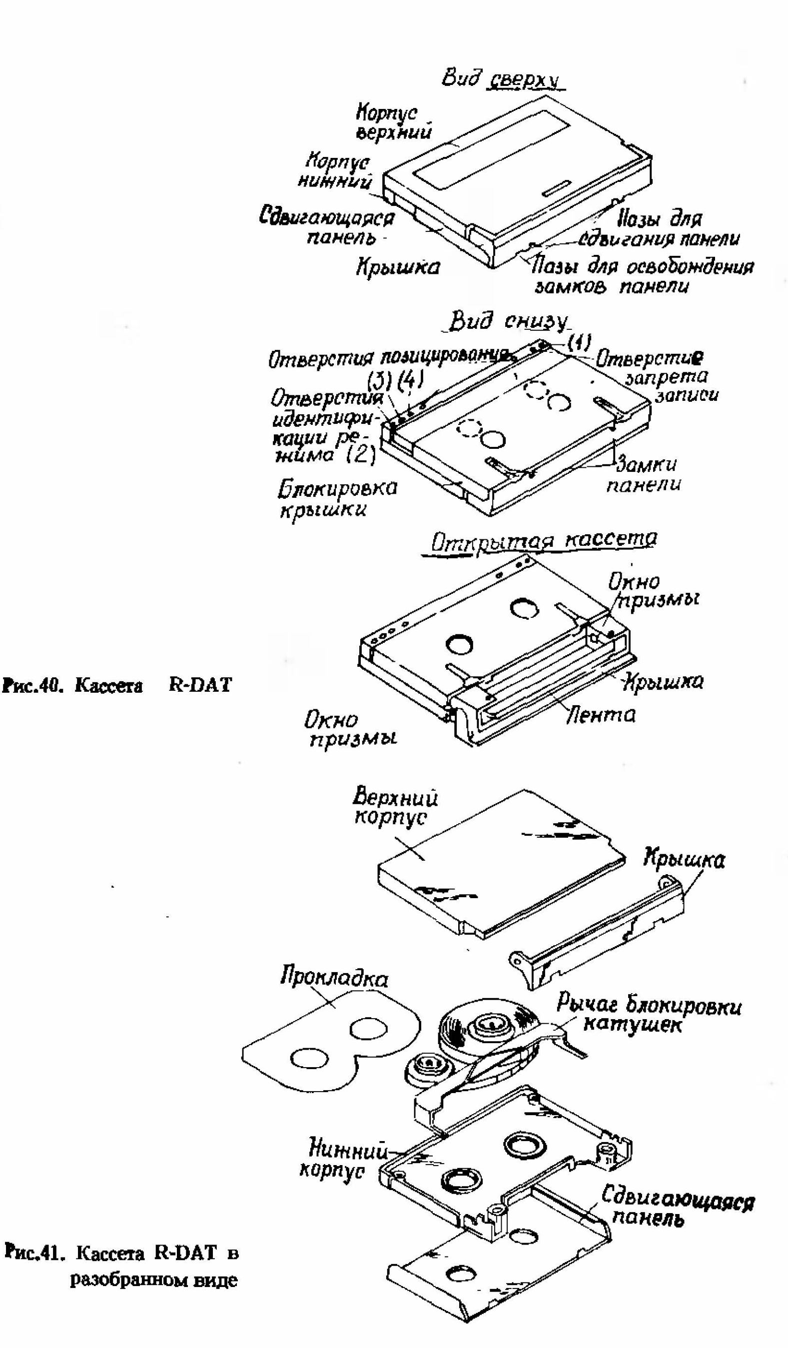


Рис.40. Кассета R-DAT

Рис.41. Кассета R-DAT в разобранном виде

к ленте и освобождая вращающуюся крышку. При этом отверстия в панели совмещаются с отверстиями в корпусе кассеты, открывая втулки сердечников подкатушечных узлов. Далее, при опускании кассеты рычаг ЛПМ поднимает вращающуюся крышку, открывая доступ к ленте, а валы подкатушечных узлов ЛПМ входят во втулки сердечников катушек кассеты.

Загрузка кассеты в различных моделях R-DAT-магнитофонов выполняется как вручную (с помощью специального контейнера-кассетоприемника), так и с помощью автоматизированных механизмов загрузки.

Кассета имеет опозновательные отверстия, предназначенные для автоматического определения параметров и типа устанавливаемой в R-DAT-магнитофон кассеты (обозначения 1–4 на рис.40). В табл.6 приведены режимы кодирования с помощью опознавательных отверстий: "1" означает, что отверстие открыто, "0" – закрыто, х – любое состояние отверстия.

Таблица 6

Отверстие 1	Отверстие 2	Отверстие 3	Замечания
0	0	0	Металлопорошковая лента или ее эквивалент (толщина 13 мкм)
0	1	0	Металлопорошковая лента или ее эквивалент (тонкая лента)
0	0	1	Широкая дорожка, толщина 13 мкм
0	1	1	Широкая дорожка, тонкая лента
1	х	х	Зарезервировано

Отверстие 4 служит для опознавания предварительно записанной (студийной) кассеты: "1" – отверстие открыто: предварительно записанная лента; "0" – отверстие закрыто: предварительно незаписанная лента.

Имеется также отверстие, предотвращающее случайное стирание записи. Отверстие действует следующим образом: "0" – отверстие закрыто, возможна запись; "1" – отверстие открыто, запись невозможна. Отверстие открывается или закрывается с помощью специального плунжера, расположенного в окне кассеты с тыльной стороны. Цвет плунжера отличается от цвета корпуса кассеты, что позволяет видеть – закрыто или открыто окно и соответственно возможно или невозможно проведение записи.

В отличие от компакт-кассеты, в которой после записи нужно выломать специальный выступ, такая система защиты записи допускает многократное использование.

Определение конца ленты производится по прозрачным ракордам с

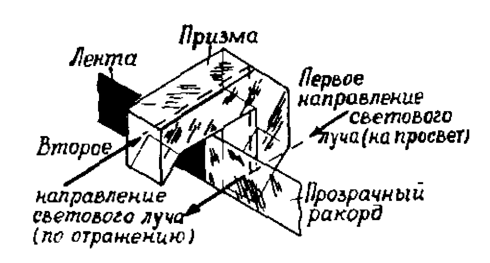


Рис.42. Конструкция призмы кассеты

помощью оптических датчиков. Для этой цели в кассету встроены две миниатюрные призмы. Призмы могут работать как на просвет, так и на отражение (рис. 42).

Длина ленты толщиной 13 мкм, обеспечивающей двухчасовую запись, составляет около 60 м. Определяющие детали кассеты должны выполняться с весьма жесткими допусками (до 0,05 мм). Это требует применения особых типов пластмасс. Допуски на габаритные размеры составляют ± 0,3 мм.

РЕЖИМ РАБОТЫ

Стандарт на R-DAT-магнитофон предусматривает шесть режимов работы, обеспечивающих их широкие возможности и гибкость использования. Параметры этих режимов приведены в табл. 7.

В основном режиме работы (1) используется частота дискретизации 48 кГц и 16-разрядное линейное квантование. Этот режим является обязательным для R-DAT-магнитофонов и применяется для записи-воспроизведения с аналогового входа магнитофона. Кроме того возможна также цифровая перезапись фонограмм с магнитофона на магнитофон с использованием их цифровых входов и выходов. В настоящее время в ряде стран развивается спутниковое ИКМ-вещание, где также применена частота дискретизации 48 кГц и 16-разрядное квантование *). Это позволяет делать безупречные записи радиовещательных программ, подавая сигнал с цифрового выхода тюнера ИКМ-вещания на цифровой вход DAT-магнитофона.

Режим 2 (частота дискретизации 32 кГц, 16-разрядное квантование) является необязательным и предназначен для записи с цифрового входа программ ИКМ-вещания. В Японии трансляция программ с частотой дискретизации 32 кГц и 16-разрядным квантованием осуществляется через спутник BS-2. При использовании частоты дискретизации 32 кГц полоса звуковых частот магнитофона сужается до 14,5 кГц.

Режим 3 (также необязательный) применяется для увеличения времени записи-воспроизведения R-DAT-магнитофона в два раза. Это

*) В Японии с 1984 года работает спутник BS-2, готовится к запуску спутник BS-3.

Таблица 7

Режим работы / Параметры	1	2	3	4	5	6
	Основной	Дополнительный	Дополнительный	Дополнительный	Предварительно записанная лента	
					нормальный	широкая дорожка
Число каналов	2	2	2	4	2	2
Частота дискретизации, кГц	48	32	32	32	44,1	44,1
Квантование (бит/выборку)	16	16	12-нелинейное		16	16
Скорость ленты, мм/с	8,15	8,15	4,075	8,15	8,15	12,25
Скорость передачи, Мбит/с	2,46	2,46	1,23	2,46	2,46	2,46
Код системы коррекции ошибок	Двойной код Рида-Сломона C1 (32, 28,5) C2 (32, 26,7)					
Канальный код	8 – 10					
Относительная скорость, м/с	3,133		1,567	3,133	3,129	3,129
Время записи, мин	120	120	240	120	120	80
Толщина ленты, мкм	13	13	13	13	13	13
Ширина дорожки, мкм	*13,591*	*13,591*	*13,591*	*13,591*	*13,591*	*20,41*
Полоса воспроизводимых частот, Гц	2–2000	30 – 14500			2 – 22000	
Магнитная лента	металлопорошковая					оксидная

достигается уменьшением в два раза линейной скорости движения ленты и скорости вращения блока головок. Поскольку относительная скорость головка-лента также снижается вдвое, необходимо уменьшить соответственно скорость передачи записываемого цифрового сигнала. Последнее достигается использованием частоты дискретизации 32 кГц и преобразованием 16-разрядного линейного квантования в 12-разрядное нелинейное. Динамический диапазон при этом не уменьшается, но несколько возрастают искажения сигнала.

Режим 4 (необязательный) предусматривает использование 12-разрядного нелинейного квантования и частоты дискретизации 32 кГц, хотя скорости движения ленты и вращения БВГ не уменьшаются относительно основного режима. Этот режим применяется для записи четырех каналов вместо двух. Возможность введения 4-канального воспроизведения рассматривается для основных источников программы DAT-магнитофонов – компакт-диска и цифрового радиовещания.

Режимы работы 5 и 6 являются обязательными для R-DAT-магнитофонов и предназначены только для воспроизведения предварительно

записанных в студиях звукозаписи кассет. Используется частота дискретизации 44,1 кГц, как и в компакт-дисковом проигрывателе. Это позволяет фирмам звукозаписи, используя одну и ту же мастер-ленту, записанную с частотой дискретизации 44,1 кГц, производить компакт-диски и кассеты с записями. Скопировать такую кассету, используя цифровой выход R-DAT-магнитофона, невозможно, как невозможно сделать и цифровую копию программы с компакт-диска, так как магнитофон не производит запись с частотой дискретизации 44,1 кГц.

Режим 6 называется режимом "широкой дорожки" и применяется для воспроизведения записей, произведенных с помощью метода скоростного контактного копирования, обеспечивающего высокую производительность и возможность применения более дешевых оксидных лент. При этом возникает потребность увеличения ширины дорожки для сохранения параметров канала воспроизведения, что уменьшает время воспроизведения до 80 минут.

На рис.43 приведена упрощенная блок-схема магнитофона формата R-DAT. При записи аналоговый сигнал поступает на вход АЦП. Отсчеты ИКМ-сигнала с выхода АЦП запоминаются в схеме памяти по определенным адресам. Считывание отсчетов ИКМ-сигнала из памяти производится в измененном порядке, чем осуществляется перемежение. Это увеличивает устойчивость системы к длинным сериям ошибок при воспроизведении. Данные считываются из памяти со скоростью большей, чем записываются, что обеспечивает сжатие сигнала. Дополнительные проверочные символы вычисляются схемой кодирования и вводятся в поток данных ИКМ-сигнала для последующего обнаружения и исправления ошибок при воспроизведении. Кроме того к основной добавляется дополнительная информация (субкод). Затем сигнал поступает в модулятор канального кода 8/10, где вся информация преобразуется к виду, оптимальному для магнитной записи-воспроизведения, через вращающийся трансформатор записывается головкой на ленте в виде последовательностей из двух значений намагниченности ленты.

При воспроизведении на выходе головки появляются импульсы, которые используются для восстановления исходного бинарного сигнала. Этот сигнал поступает в схему ФНЧ через корректор, восстанавливающий форму импульсов. Демодулятор 10/8 преобразует модулированный сигнал в значения цифрового сигнала. Происходит отделение дополнительной информации субкода, которая поступает в управляющую схему магнитофона, а данные ИКМ-сигнала с проверочными символами запоминаются в блоке памяти. Схемой коррекции осуществляется обнаружение и исправление ошибок. При считывании из памяти отсчетов ИКМ-сигнала происходит их деперемежение и "удаление" детонации. Схема интерполяции маскирует ошибочные значения ИКМ-сигнала, которые не могли быть скорректированы схемой коррекции. Далее сигнал поступает в ЦАП, восстанавливающий исходную аналоговую форму звукового сигнала.

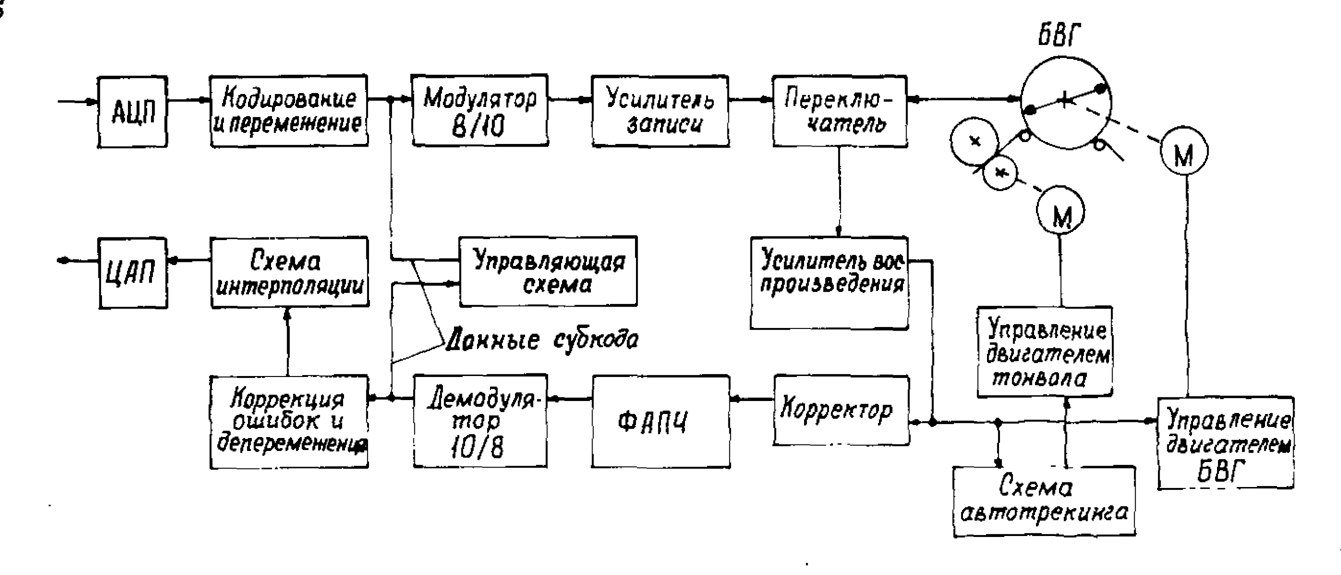


Рис.43. Упрощенная блок-схема R-DAT-магнитофона

Для того, чтобы вращающиеся головки четко следовали по очень узким наклонным дорожкам, на ленту данных записываются специальные сигналы системы поиска дорожек (автотрекинга). Автоматическая система слежения оперирует этими сигналами для того, чтобы управлять двигателем ведущего вала. Схема управления двигателем БВГ обеспечивает возможность считывания данных субкода в режимах быстрого поиска нужного участка записи.

СТРУКТУРА ДОРОЖКИ ЗАПИСИ

Наклонная дорожка R-DAT-магнитофона содержит пять основных зон, предназначенных для записи основных, дополнительных данных и служебных сигналов.

Зона, где производится запись цифрового звукового сигнала двух стереоканалов вместе с проверочными данными системы коррекции ошибок, расположена в центре дорожки и занимает большую площадь по сравнению с другими зонами. В дальнейшем ее будем называть зоной ИКМ. С обоих краев этой зоны располагаются зоны записи сигналов системы автопоиска дорожек (автотрекинга). С помощью этих сигналов определяется смещение головки относительно дорожки записи и обеспечивается точное слежение головки за "своей" дорожкой. Далее с обоих краев дорожки также расположены две зоны, предназначенные для записи дополнительных данных – субкода, обеспечивающего сервисные функции магнитофона. Кроме того, в начале и конце дорожки записываются специальные "маркеры дорожки" – сигналы, предназначенные для ввода в режим синхронизации системы ФАПЧ, вырабатывающей синхроимпульсы для детектирования воспроизводимого с ленты сигнала. Впереди и позади зон субкода расположены небольшие зоны, также служащие для целей синхронизации ФАПЧ. Они носят название маркеров начала и конца сообщения. Маркер начала сообщения расположен перед ИКМ-зоной. Сигналы автотрекинга отделены от зон субкода и ИКМ-сигнала специальными зонами, где записывается сигнал стирания, который не несет информации, но необходим для заполнения межзонных промежутков. Так как в R-DAT-магнитофоне нет стирающей головки, то старая запись стирается путем перезаписи новым сигналом.

Цифровой сигнал на дорожке записи разделяется на отдельные блоки. Каждый блок имеет "длину" в 288 бит. Все зоны записи дорожки имеют емкость, кратную целому числу блоков. Всего дорожка может вместить 196 блоков, т.е. 196х288 = 56048 бит. Все это относится к цифровому сигналу, еще не подвергшемуся канальному кодированию. В процессе канального кодирования восьмиразрядные группы (байты), на которые предварительно разбивается цифровой сигнал, преобразуются в 10-разрядные канальные слова. Поэтому число канальных бит, которые пишутся на пленку непосредственно, в 10/8 раз больше числа бит цифрового сигнала. После преобразования с помощью канального кода

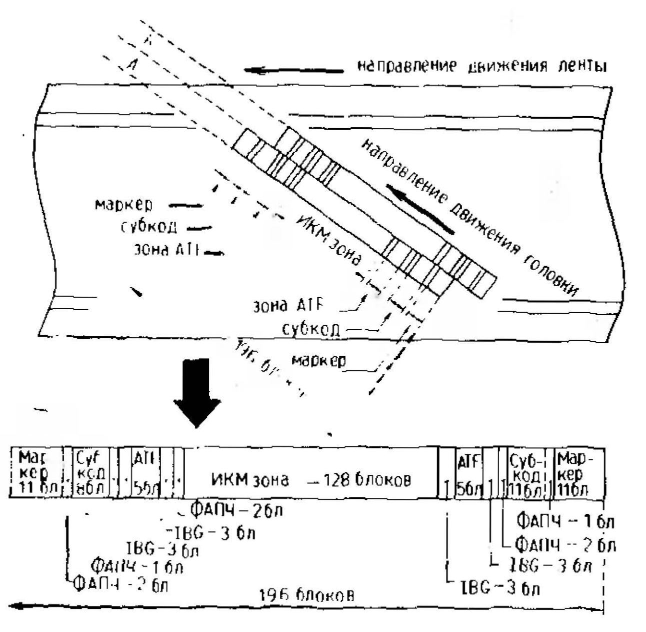


Рис.44. Размещение зон данных на дорожке записи

Таблица 8

Зоны дорожки	Угол, град	Количество блоков	Время, мкс
1. Маркер	5,051	11	420,9
2. Сигнал ФАПЧ (маркер субкода)	0,918	2	76,5
3. Субкод-1	3,673	8	308,1
4. Сигнал ФАПЧ (маркер конца)	0,459	1	38,3
5. *Защитный интервал (IBG) (сигнал* стирания)	1,378	3	114,8
6. Сигналы автотрекинга (ATF)	2,296	5	191,3
7. Защитный интервал (IBG)	1,378	3	114,8
8. Сигнал ФАПЧ (маркер ИКМ)	0,918	2	76,5
9. ИКМ-зона	58,776	128	4892,0
10. Защитный интервал (IBG)	1,378	3	114,8
11. Сигналы автотрекинга (ATF)	2,296	5	191,3
12. Защитный интервал (IBG)	1,378	3	114,8
13. Сигнал ФАПЧ	0,918	2	76,5
14. Субкод-2	3,673	8	308,1
15. Сигнал ФАПЧ	0,459	1	38,3
16. Маркер	5,051	11	420,9
	90,0	196	7500,0

один блок содержит 360 канальных бит. Размещение зон на дорожках записи приведено на рис. 44.

В табл. 8 приведены временные параметры зон записи и углы, соответствующие повороту барабана с головками, обеспечивающие запись этих зон. Все параметры рассчитаны для БВГ диаметром 30 мм и угла охвата лентой в 90°.

Один блок цифровых данных ИКМ-зоны состоит из двух основных частей – служебной части и основных данных. В качестве основных данных могут использоваться только значения ИКМ-сигнала, или значения ИКМ-сигнала и значения данных системы коррекции ошибок, или только значения проверочных данных системы коррекции.

Из 288 бит блока основные данные занимают 256 бит, или 32 восьмиразрядных символа, остальные 32 бит используются в качестве служебной части. Первые 8 бит занимает синхропоследовательность, служащая для определения начала каждого блока, что необходимо для безошибочного детектирования воспроизводимого сигнала схемой ФАПЧ. Синхропоследовательность имеет такое сочетание нулей и единиц, которое не встречается в цифровом сигнале, преобразованном с помощью канального кода 8–10. Эта особенность позволяет выделить ее при воспроизведении и определить начало каждого блока данных. Следующие за синхропоследовательностью 16 бит (2 символа) информации занимает код основной идентификации, где записываются данные о режиме работы магнитофона при записи фонограммы, адрес блока, адрес кадра информации. Кадром информации в R-DAT-формате считается информация, заключенная в двух смежных дорожках, записанных головками A (+азимут) и B (–азимут). Адрес кадра регистрируется четырьмя двоичными разрядами и может изменяться от 0 до 15, т.е. через 16 пар дорожек адрес кадра вновь становится нулевым, и отсчет



Рис.45. Структура блоков дорожки: *а*) структура блока данных ИКМ-зоны; (*б*) структура блока данных зоны субкода

начинается снова. Адрес блока данных изменяется от 0 до 127 в ИКМ-зоне одной дорожки. Последние 8 бит из части блока служебных данных составляют биты проверки сигналов кода основной идентификации на четность. Эта проверка позволяет определить, безошибочно ли считан код основной идентификации с дорожки. Структура блока данных ИКМ-зоны показана на рис.45,*а*. Блок субкода имеет такую же структуру (*рис.45,б*). *Непосредственно данные субкода занимают 256 бит из 288.* Первые 8 бит служебной части занимает такая же синхропоследовательность, следующие 16 бит – код дополнительной идентификации и затем 8 бит – проверка на четность кода дополнительной идентификации.

Код дополнительной идентификации содержит информацию об адресе блока субкода, который может изменяться от 0 до 15 на одной дорожке записи (от 0 до 7 – для 1-й зоны субкода и от 8 до 15 – для 2-й зоны субкода).

В зоне ИКМ одной дорожки могут быть размещены 128x32 = 4096 восьмиразрядных символов, из них символов основных данных – 2912. Остальные символы – это проверочные данные системы коррекции ошибок. Всего в зонах субкода одной дорожки можно разместить 512 символов, из них 448 символов данных субкода и 64 символа проверочных данных.

СТРУКТУРА ЗВУКОВОГО ИКМ-СИГНАЛА

При записи с выхода АЦП поступают с частотой дискретизации 16-разрядные значения отсчетов левого (L_i) и правого (R_i) каналов (рис.46). Так как блоки данных ИКМ-зоны, куда записывается звуковой сигнал, состоят из 8-разрядных символов, то каждое 16-разрядное слово ИКМ-сигнала преобразуется в два 8-разрядных символа. Символы левого и правого каналов записываются на дорожку с использованием метода временного разделения. Размещение отсчетов левого и правого каналов в разных кадрах информации одинаково, т.е. алгоритм размещения повторяется через две дорожки. Один кадр информации соответствует одному периоду вращения БВГ (30 мс). При частоте дискретизации 48 кГц число отсчетов двух каналов за один оборот БВГ будет$(48 \cdot 1000 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 2)$= = 2880 16-разрядных слов левого и правого каналов, размещаемых на двух дорожках. На одной дорожке должно быть размещено 1440 слов

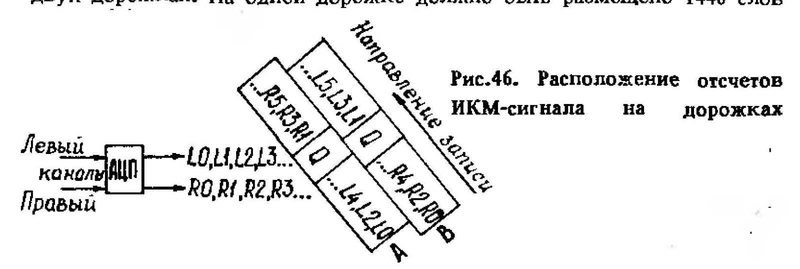


Рис.46. Расположение отсчетов ИКМ-сигнала на дорожках

или 2880 символов. Как уже отмечалось ранее, емкость ИКМ-зоны дорожки составляет 2912 символов или 1456 слов. 16 слов из ИКМ-зоны остаются неиспользованными. При записи вместо данных эти слова заменяются нулевыми значениями. При работе в режиме с частотой дискретизации 44,1 кГц и 32 кГц таких неиспользованных слов становится больше – 33 и 496 соответственно. Заполнение ИКМ-зон дорожек в различных режимах звуковых каналов показано на рис.47. Нечетные и четные отсчеты каждого канала максимально разносятся друг от друга. Четные отсчеты левого канала записываются в начале первой дорожки кадра, а нечетные – в конце второй дорожки. Наоборот, четные выборки правого канала записываются в конце первой дорожки, а нечетные – в начале второй.

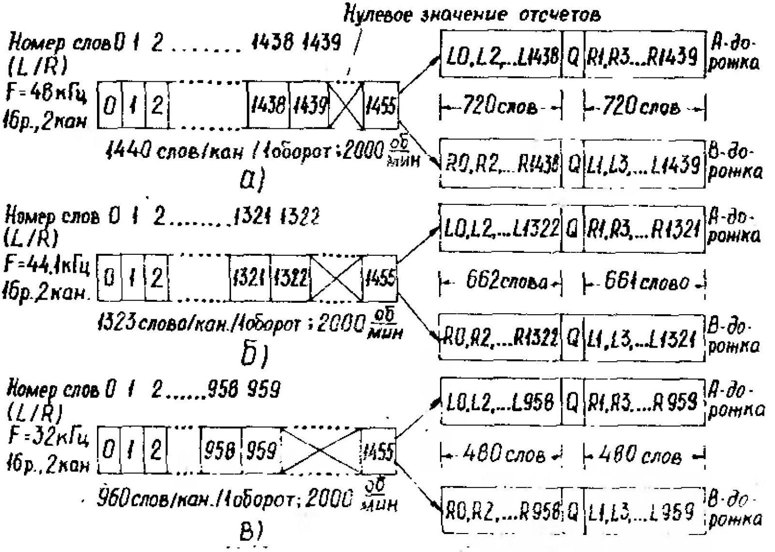


Рис.47. Заполнение ИКМ-зон дорожек в различных режимах:
а) 48 кГц, 16 разрядов; б) 44,1 кГц, 16 разрядов; в) 32 кГц, 16 разрядов

Перемежение звукового сигнала на двух дорожках используется для маскировки ошибочных отсчетов ИКМ-сигнала, которые не могут быть исправлены системой коррекции ошибок. Система коррекции "помечает" в процессе декодирования считанного с ленты сигнала неисправимые отсчеты, которые заменяются в схеме маскировки ошибок (или схеме интерполяции) средним значением от значений двух соседних правильных отсчетов. Такая операция называется линейной интерполяцией (рис.48).

Перемежение сигнала в формате R-DAT позволяет восстановить сигнал теоретически с помощью интерполяции даже при полном

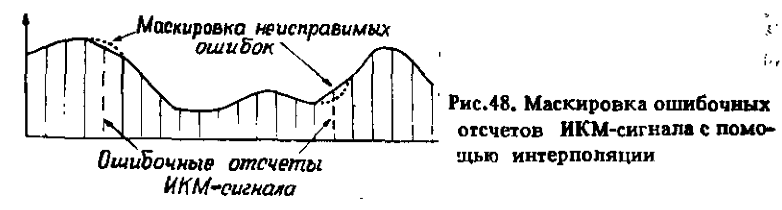


Рис.48. Маскировка ошибочных отсчетов ИКМ-сигнала с помощью интерполяции

загрязнении одной из головок. При этом пропадут данные одной из дорожек, например, нечетные отсчеты левого канала и четные отсчеты правого. По отсчетам, воспроизводимым со второй дорожки, может быть восстановлен записанный сигнал. Аналогичный эффект маскировки достигается при продольном повреждении ленты на половине длин дорожек. В этом случае по оставшимся значениям нечетных или четных отсчетов может быть восстановлен сигнал.

Интерполяция ведет к некоторому искажению звукового сигнала, выражающемуся в повышении уровня шума на высоких частотах. Однако интерполяции, следующие достаточно редко, на слух не воспринимаются и на качестве звучания не сказываются. В случае длинных интерполяций возможно ухудшение качества звучания на высоких частотах, что должно побудить владельца магнитофона к каким-либо действиям: заменить ленту или произвести чистку головок и БВГ.

Если несколько соседних отсчетов оказываются ошибочными, схема интерполяции уже не может произвести маскировку ошибок. В этом случае схема интерполяции переходит в режим молчания – звуковой сигнал не поступает на выход магнитофона.После появления правильных отсчетов схема переходит в обычный режим работы. Чтобы избежать резкого щелчка в момент отключения-включения сигнала, значения нескольких безошибочных отсчетов (обычно 30) плавно уменьшаются до нулевого значения. При появлении правильных отсчетов их значения на выходе схемы плавно увеличиваются (обычно также берется 30 отсчетов) до истинных значений. Кратковременные одиночные умолчания остаются незамеченными из-за инерционности слухового аппарата человека и не влияют на качество воспроизведения.

СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ОШИБОК

В предыдущем разделе мы рассмотрели маскировку ошибок с помощью перемежения отсчетов звукового сигнала и интерполяции. Обнаружение ошибок и исправление их осуществляется с помощью системы коррекции. Применение маскировки ошибок является крайним случаем.

Как уже отмечалось, для цифровой магнитной записи характерны ошибки двух типов – одиночные, приводящие к искажению одного бита, пакетные (многократные), приводящие к потере целой группы бит-

Основные источники одиночных ошибок – шум носителя, магнитной головки, усилителя воспроизведения и перекрестные помехи с соседних дорожек. Так как для увеличения плотности записи на единицу поверхности приходится уменьшать ширину дорожек, то уменьшается до 20–30 дБ отношение сигнал-шум, а также отношение сигнал-помеха. Уровень перекрестных искажений с соседних дорожек записи обычно выбирается на уровне шума носителя дорожки записи. Даже при достаточно большой амплитуде воспроизводимого сигнала всегда существует некоторая вероятность, что шумовой выброс превысит записанный на пленке сигнал, и некоторые биты будут воспроизведены ошибочно. Напомним, что цифровой сигнал, записанный на ленту, преобразуется с помощью группового канального кода 8–10, преобразующего 8-разрядные символы в 10-разрядные группы. Случайная ошибка, изменяющая значение одного бита в 10-разрядной группе, может привести к неправильной демодуляции 8-разрядного символа при воспроизведении. Система коррекции должна быть готова к потере 8 последовательных бит из-за одиночной ошибки и быть способной исправлять их. Для решения этой задачи необходимо выбрать помехоустойчивый код, оперирующий не с двоичными сигналами, а с 8-разрядными символами. Исправление таким кодом одиночной ошибки означает исправление ошибочной последовательности из 8 бит.

В качестве такого кода в R-DAT-магнитофонах применяется двойной код Рида-Соломона. Двойное кодирование звукового ИКМ-сигнала используется для повышения эффективности защиты от пакетных ошибок. Пакетные ошибки, или выпадения, вызываются дефектами ленты, загрязнением головки и ленты частицами пыли, продуктами износа магнитного слоя, а также сбоями в системе автотрекинга, ФАПЧ и т.д. При высокоплотной записи небольшая пылинка, попавшая на ленту, при прохождении головки "отжимает" ленту, вызывая выпадение сразу группы бит (рис.49).

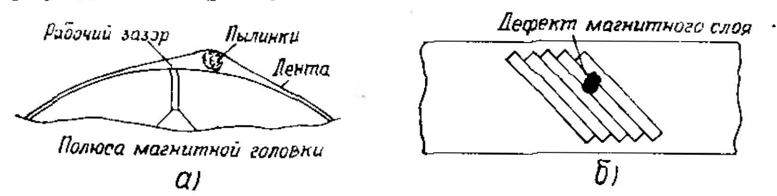


Рис.49. Механизмы образования выпадений сигнала: *а*) загрязнение ленты или головки; *б*) повреждение ленты

Как упоминалось, к системе коррекции ошибок предъявляются два требования: эффективно обнаруживать и корректировать одиночные ошибки и пакеты ошибок. Причем эти виды ошибок не связаны друг с другом. Так называемый внутренний код Рида-Соломона используется для коррекции случайных одиночных ошибок, а внешний код – для коррекции пакетных ошибок. При образовании проверочных символов

каждый символ данных участвует в этом процессе два раза: при образовании проверочных символов внешнего и внутреннего кодов. Использование кодирования в два этапа значительно повышает эффективность системы. Чтобы обнаружить и скорректировать один ошибочный символ в данных, для кодов Рида-Соломона необходимо иметь два дополнительных проверочных символа. Для коррекции двух символов необходимо 4 проверочных символа и т.д. Но, если известно положение ошибочного символа, определенного, например, с помощью внутреннего кода, то для коррекции такого меченного символа необходим всего один добавочный символ. Таким образом, исправляющая способность внешнего кода С2, декодирующего данные на втором этапе, после первого декодирования с помощью внутреннего кода С1 может быть повышена в два раза.

Большое значение для повышения эффективности системы коррекции представляет выбор способа распределения двух кодов относительно данных, а также выбор параметров перемежения данных внутри дорожки, позволящий корректировать пакеты ошибок при относительно небольшой исправляющей способности кодов. Конечно, можно было бы увеличивать исправляющую способность кодов, добавляя дополнительные проверочные символы, но тогда большую часть дорожки занимали бы не отсчеты ИКМ звукового сигнала, а эти проверочные символы.

Рассмотрим расположение символов данных и проверочных символов на дорожке записи. Расположение основных и проверочных данных на одной дорожке удобно представить в виде таблицы, где каждый столбец содержит символы одного блока (без служебной части), (табл.9). Длина строки таблицы для ИКМ-зоны равна 128, для одной зоны субкода – 8. Столбцы нумеруются соответственно адресам блоков на дорожке: для ИКМ-зоны – от 0 до 127. Глубина столбцов равна числу символов данных в блоке, нумерация строк – от 0 до 31. Каждый элемент таблицы имеет двойную нумерацию, например, D_{ij}. Здесь i – номер столбца (соответственно блока), а j – номер строки (символа в блоке). Буквами D_{ij} означают 8-разрядные символы данных, в качестве которых используются значения ИКМ-синала, P_{ij} – проверочные символы внутреннего кода Рида-Соломона, Q_{ij} – проверочные символы внешнего кода Рида-Соломона.

В центре таблицы (соответственно и дорожки записи) размещаются, как уже упоминалось, проверочные символы Q внешнего кода С2 в блоках с адресами от 52 до 75. Эти блоки не содержат данных (значений ИКМ-синала). Проверочные символы внутреннего кода С1 размещаются в конце каждого блока с нечетным адресом и занимают 8 символов этого блока. Причем проверочные символы Q кода С2 также содержит символы Р кода С1.

Рассмотрим механизм перемежения кодовых слов кодов С1 и С2. Кодовое слово включает в себя символы данных и проверочные сим-

Таблица 9

	0	1	2	3	4	5	6		52	53	54	55	56	57		121	122	123	124	125	126	127
0	D0,0	D1,0	D2,0	D3,0	D4,0	D5,0	D6,0	...	Q52,0	Q53,0	Q54,0	Q55,0	Q56,0	Q57,0	...	D121,0	D122,0	D123,0	D124,0	D125,0	D126,0	D127,0
1	D0,1	D1,1	D2,1	D3,1	D4,1	D5,1	D6,1	...	Q52,1	Q53,1	Q54,1	Q55,1	Q56,1	Q57,1	...	D121,1	D122,1	D123,1	D124,1	D125,1	D126,1	D127,1
2	D0,2	D1,2	D2,2	D3,2	D4,2	D5,2	D6,2	...	Q52,2	Q53,2	Q54,2	Q55,2	Q56,2	Q57,2	...	D121,2	D122,2	D123,2	D124,2	D125,2	D126,2	D127.2
3	D0,3	D1,4	D2,3	D3,3	D4,3	D5,3	D6,3	...	Q52,3	Q53,3	Q54,3	Q55,3	Q56,3	Q57,3	...	D121,3	D122,3	D123,3	D124,3	D125,3	D126,3	D127,3
4	D0,4	D1,4	D2,4	D3,4	D4,4	D5,4	D6,4	...	Q52,4	Q53,4	Q54,4	Q55,4	Q56,4	Q57,4	...	D121,4	D122,4	D123,4	D124,4	D125,4	D126,4	D127,4
5	D0,5	D1,5	D2,5	D3,5	D4,5	D5,5	D6,5	...	Q52,5	Q53,5	Q54,5	Q55,5	Q56,5	Q57,5	...	D121,5	D122,5	D123,5	D124,5	D125,5	D126,5	D127,5
6	D0,6	D1,6	D2,6	D3,6	D4,6	D5,6	D6,6	...	Q52,6	Q53,6	Q54,6	Q55,6	Q56,6	Q57,6	...	D121,6	D122,6	D123,6	D124,6	D125,6	D126,6	D127,6
7	D0,7	D1,7	D2,7	D3,7	D4,7	D5,7	D6,7	...	Q52,7	Q53,7	Q54,7	Q55,7	Q56,7	Q57,7	...	D121,7	D122,7	D123,7	D124,7	D125,7	D126,7	D127,7
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
23	D0,23	D1,23	D2,23	D3,23	D4,23	D5,23	D6,23	...	Q52,23	Q53,23	Q54,23	Q55,23	Q56,23	Q57,23	...	D121,23	D122,23	D123,23	D124,23	D125,23	D126,23	D127,23
24	D0,24	P1,24	D2,24	P3,24	D4,24	P5,24	D6,24	...	Q52,24	P53,24	Q54,24	P55,24	Q56,24	P57,24	...	P121,24	D122,24	P123,24	D124,24	P125,24	D126,24	P127,24
25	D0,25	P1,25	D2,25	P3,25	D4,25	P5,25	D6,25	...	Q52,25	P53,25	Q54,25	P55,25	Q56,25	P57,25	...	P121,25	D126,25	P123,25	D124,25	P125,25	D126,25	P127,25
26	D0,26	P1,26	D2,26	P3,26	D4,26	P5,26	D6,26	...	Q52,26	P53,26	Q54,26	P55,26	Q56,26	P57,26	...	P121,26	D122,26	P123,26	D124,26	P125,26	D126,26	P127,26
27	D0,27	P1,27	D2,27	P3,27	D4,27	P5,27	D6,27	...	Q52,27	P53,27	Q54,27	P55,27	Q56,27	P57,27	...	P121,27	D122,27	P123,27	D124,27	P125,37	D126,27	P127,27
28	D0,28	P1,28	D2,28	P3,28	D4,28	P5,28	D6,28	...	Q52,28	P53,28	Q54,28	P55,28	Q56,28	P57,28	...	P121,28	D122,28	P123,28	D124,28	P125,28	D126, 28	P127,28
29	D0,29	P1,29	D2,29	P3,29	D4,29	P5,29	D6,29	...	Q52,29	P53,29	Q54,29	P55,29	Q56,29	P57,29	...	P121,29	D122,29	P123, 29	D124,29	P125,29	D126,29	P127,29
30	D0,30	P1,30	D2,30	P3,30	D4,30	P5,30	D6,30	...	Q52,30	P53,30	Q54,30	P55,30	Q56,30	P57,30	...	P121,30	D122,30	P123,30	D124,30	P125,30	D126,30	P127,30
31	D0,31	P1,31	D2,31	P3,31	D4,31	P5,31	D6,31	...	Q52,31	P53,31	Q54,31	P55,31	Q56,31	P57,31	...	P121,31	D122,31	P123,31	D124,31	P125,31	D126,31	P127,31

волы, предназначенные для коррекции этих данных. Длина кодовых слов кодов С1 и С2 составляет 32 символа. Кодовое слово кода С1 содержит 28 символов данных, которыми могут являться как значения ИКМ-сигнала, так и проверочные символы внешнего кода Q и 4 проверочных символа Р. Кодовое слово внешнего кода С2 содержит 26 символов данных и 6 проверочных символов.

В таблице эти кодовые слова размещены взаимно перпендикулярно. Кодовые слова кода С1 читаются и пишутся в таблицу по столбцам, а кодовые слова кода С2 – по строкам. Два смежных столбца таблицы (блока дорожки) содержат соответственно два кодовых слова кода С1, а одна строка таблицы, состоящая из символов с одинаковым расположением в блоках дорожки, – четыре кодовых слова кода С2. Такое расположение кодов позволяет эффективно исправлять пакетные ошибки, причем случайные одиночные ошибки практически не оказывают влияния на исправление пакетных ошибок.

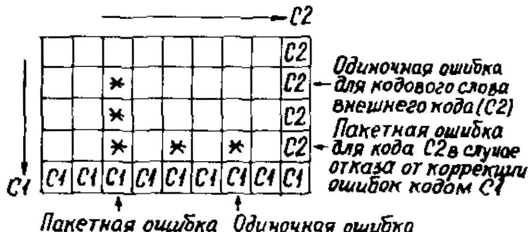


Рис.50. Исправление случайных и пакетных ошибок с помощью двойного кода

Наглядно это можно продемонстрировать с помощью рис.50. Пусть в массиве данных, образующих таблицу, произошли пакетная и случайная ошибки. Если случайная ошибка может быть скорректирована с помощью вертикального кода (в нашем случае – С1), то при считывании горизонтальных кодовых слов отпадает необходимость дополнительных затрат на ее коррекцию, что позволяет использовать горизонтальный код (С2) более полно для коррекции пакетных ошибок.

Кроме того, как уже говорилось, обнаружение и идентификация ошибок с помощью внутреннего кода позволяет увеличить корректирующую способность внешнего кода. В случае невозможности коррекции ошибки внутренним кодом (максимально возможное количество исправляемых ошибок для кода С1 равно двум) всем символам в кодовом слове присваивается флаг ошибки. Внешний код использует эти флаги как указатели ошибок. Так как для внешнего кода С2 в этом случае нет необходимости искать местоположение ошибочных символов, его корректирующая способность возрастает в два раза. Символы, помеченные флагом ошибки, называются стираниями. Внешний код способен исправлять до шести таких стираний.

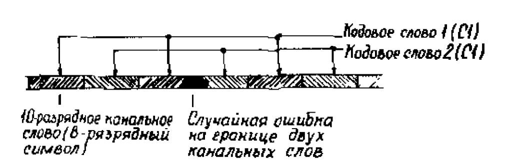


Рис.51. Случайная ошибка, искажающая два сложных символа данных, и защита от двойной ошибки с помощью перемежения

Неприятным фактором является случайная ошибка, появляющаяся на границе двух символов дорожки, представленных 10-битовыми канальными группами. При этом возможно искажение сразу двух смежных символов (рис.51). Для защиты от такого рода случайных ошибок в коде С1 принято перемежение кодовых слов с интервалом два символа при записи на дорожку. Четные символы двух смежных блоков составляют первое кодовое слово, нечетные – второе. Из восьми проверочных символов, размещенных в конце второго блока, на долю каждого кодового слова приходится по четыре (рис.52).

Для кода С2 интервал перемежения принят в 4 блока, т.е. символы первого кодового слова внешнего кода выбираются из блоков с адресами 0, 4, 8, ..., 124. Символы второго кодового слова расположены в этой же строке в блоках с адресами 1, 5, 9, 11, ..., 125 и т.д. (рис.53).

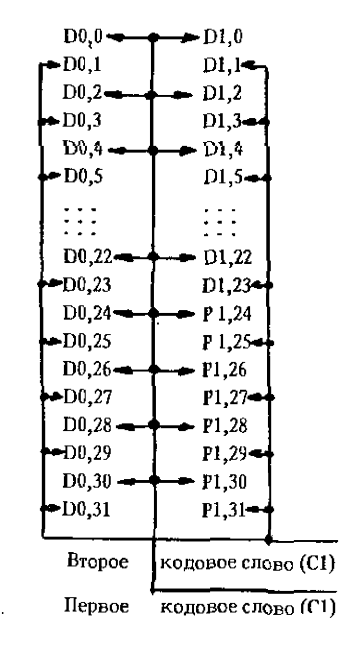
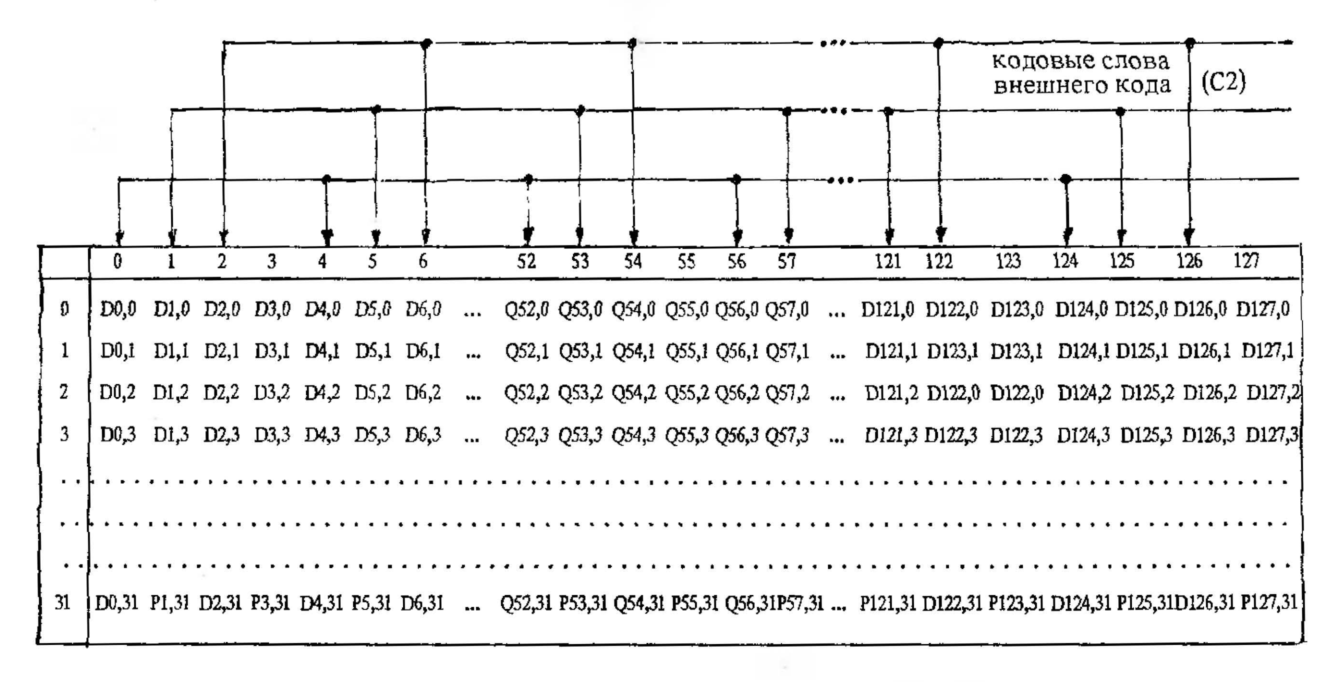


Рис.52. Перемежение данных для внутреннего кода



	0	1	2	3	4	5	6		52	53	54	55	56	57		121	122	123	124	125	126	127
0	D0,0	D1,0	D2,0	D3,0	D4,0	D5,0	D6,0	...	Q52,0	Q53,0	Q54,0	Q55,0	Q56,0	Q57,0	...	D121,0	D122,0	D123,0	D124,0	D125,0	D126,0	D127,0
1	D0,1	D1,1	D2,1	D3,1	D4,1	D5,1	D6,1	...	Q52,1	Q53,1	Q54,1	Q55,1	Q56,1	Q57,1	...	D121,1	D123,1	D123,1	D124,1	D125,1	D126,1	D127,1
2	D0,2	D1,2	D2,2	D3,2	D4,2	D5,2	D6,2	...	Q52,2	Q53,2	Q54,2	Q55,2	Q56,2	Q57,2	...	D121,2	D122,0	D122,0	D124,2	D125,2	D126,2	D127,2
3	D0,3	D1,3	D2,3	D3,3	D4,3	D5,3	D6,3	...	Q52,3	Q53,3	Q54,3	Q55,3	Q56,3	Q57,3	...	D121,3	D122,3	D122,3	D124,3	D125,3	D126,3	D127,3
..	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
..	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
..	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
31	D0,31	P1,31	D2,31	P3,31	D4,31	P5,31	D6,31	...	Q52,31	P53,31	Q54,31	P55,31	Q56,31	P57,31	...	P121,31	D122,31	P123,31	D124,31	P125,31	D126,31	P127,31

Рис.53. Перемежение данных для внешнего кода

16-разрядное ИКМ-слово с выхода АЦП

Старший разряд							Li или Ri								Младший разряд
1	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Liu или Riu								LiL или RiL							
15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Рис.54. Формирование 8-разрядных символов из 16-разрядного слова

При пакетной ошибке в 4 блока в одном кодовом слове кода С2 появится лишь одна ошибка (по одной ошибке во всех словах кода С2). Так как внешний код допускает исправление до шести стираний, пакетной ошибкой может быть испорчено до 24 смежных блоков, при этом возможна полная коррекция. Это соответствует длине поврежденной части дорожки в 2,5 мм, однако этого достаточно, чтобы компенсировать эффект потери сигнала при попадании мелкого мусора на ленте. Дальнейшая коррекция выполняется, как было сказано ранее, с помощью интерполяции звуковых отсчетов.

Рассмотрим процесс кодирования-декодирования. Прежде всего заметим, что за данными, обозначаемыми нами как D_{ij} стоят значения отсчетов ИКМ-сигнала. Для формирования сигнала перед записью на ленту необходимы оперативные запоминающие устройства. Для записи одной дорожки (таблицы) необходимо ОЗУ емкостью 4096 (128x32) символа или 4 Кбайта. ИКМ звуковой сигнал, поступающий с АЦП в виде 16-разрядных слов, разбивается на 8-разрядные слова-символы (рис.54) и записывается в определенном порядке по принятому алгоритму двухдорожечного перемежения в ОЗУ, формирующем кадр информации (две дорожки).

Перед записью на ленту происходит кодирование данных, запомненных в ОЗУ: схемой коррекции добавляются проверочные символы Q и P по соответствующим адресам ОЗУ.

Процесс *кодирования происходит следующим образом.* В схему кодирования считываются кодовые слова, по значениям которых вычисляются проверочные символы. Например, для первого кодового слова кода С2 выбираются символы из нулевой строки из столбцов с адресами 0, 4, 8 ..., 124. Вычисленные для этого проверочные символы Q записываются в столбце с адресами 52, 56, 60, 64, 68, 72. Для каждого кодового слова кода С2 вычисляется 6 проверочных символов. Затем выбирается второе слово, начиная со столбца 1, 5, ..., 125. Проверочные символы записываются соответственно в столбце 53, 57, ..., 73. Всего необходимо закодировать 112 слов кода С2. Для блоков с нечетными адресами последние 8 символов блока – проверочные кода С1, поэтому последние 8 строк таблицы содержат по 2, а не по 4 кодовых слова

внешнего кода. После кодирования для внешнего кода производится кодирование для внутреннего кода C1. Из двух смежных блоков выбираются сначала четные символы первого кодового слова, по которым вычисляются символы P24, P26, P28, P30. Затем вычисляются проверочные символы P25, P27, P29, P31 второго кодового слова, имеющего нечетные символы в блоках. Таким же образом кодируются проверочные символы Q внешнего кода.

При воспроизведении информация с дорожки заносится в ОЗУ, после чего декодируется с помощью коррекции. Здесь, наоборот, сначала выбираются и декодируются слова внутреннего кода, затем – внешнего. При обнаружении внутренним кодом более двух ошибок происходит отказ от декодирования, и всем символам кодового слова присваивается флаг ошибки (происходит стирание). Хотя обнаруживающая способность внутреннего кода достаточно высока, на второй ступени декодирования также происходит обнаружение ошибок, даже если из первой ступени не поступает никаких флагов. Процесс принятия решения при наличии определенного числа ошибок и флагов (стирания) зависит от конкретной стратегии декодирования. Хотя внешний код имеет исправляющую способность до трех символов, она, как правило, никогда не используется полностью, так как это связано со значительным усложнением декодера. Если внешним кодом обнаруживается два или более ошибочных символа в кодовом слове, то процесс коррекции начинает использовать флаги ошибок из внутреннего кода, чтобы исправить до шести стираний. При превышении исправляющей способности внешнего кода происходит отказ от декодирования, и все символы кодового слова помечаются флагом ошибки. Эти флаги анализируются схемой интерполяции, и ошибочные символы маскируются. В крайних случаях происходит отключение выхода магнитофона. Для хранения флагов может использоваться то же ОЗУ, что и для записи-воспроизведения. После декодирования какого-либо кодового слова внутреннего кода C1 флаги этого кода могут быть записаны на место проверочных символов P, которые уже не нужны. После второй ступени декодирования с помощью кода C2 флаги записываются на место символов Q и считываются вместе со значениями отсчетов ИКМ-сигнала в интерполятор, с выхода которого ИКМ-сигнал поступает в ЦАП.

Для организации преобразования временного масштаба ИКМ-сигнала, его кодирования и декодирования необходимо наличие в схеме R-DAT-магнитофона не менее двух ОЗУ, каждое из которых может хранить кодированную информацию, соответствующую двум дорожкам записи. Емкость ОЗУ должна составлять не менее 2x4096 байт или 64 Кбит.

В то время, когда с помощью одного ОЗУ осуществляется кодирование или декодирование данных, во втором ОЗУ производится запись ИКМ-сигнала, поступающего с АЦП, или считывание значений декодированного ИКМ-сигнала в ЦАП (в зависимости от режима работы маг-

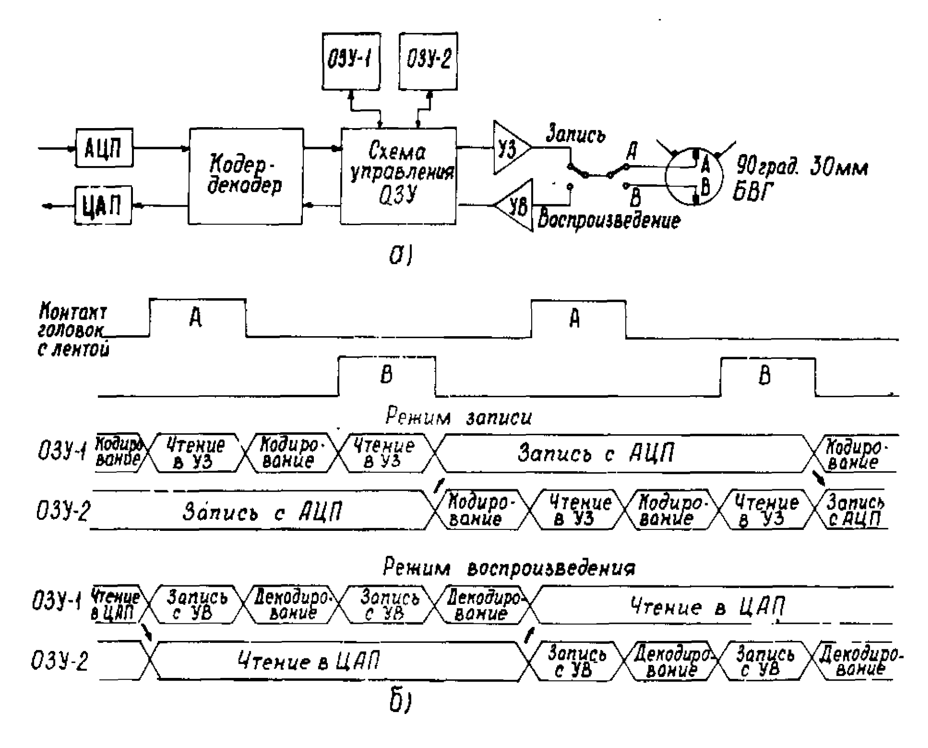


Рис.55. Режим работы ОЗУ *R-DAT*-магнитофона: *а*) структурная схема; *б*) диаграмма работы

нитофона – запись или воспроизведение). Затем ОЗУ меняются местами: сигнал, записанный в режиме записи во второе ОЗУ, подвергается кодированию и подается на вход усилителя для записи на ленту. При этом обеспечивается временное сжатие сигнала путем считывания с частотой, превышающей частоту дискретизации АЦП почти в три раза. В режиме воспроизведения после считывания всех записанных отсчетов ИКМ-сигнала в ЦАП второе ОЗУ подключается к усилителю воспроизведения, и в него начинают записываться данные, поступающие с ленты. В это время в ЦАП из первого ОЗУ поступают откорректированные схемой декодирования значения ИКМ-сигнала. Кодирование и декодирование производится в момент времени, когда ни одна из головок не касается ленты (угол охвата 90°). На рис.55 приведены соответствующие диаграммы работы ОЗУ магнитофона.

Переключение ОЗУ позволяет обеспечить непрерывность процесса записи или воспроизведения ИКМ-сигнала при дискретном характере сигнала, поступающего с головок или записывающегося на магнитную ленту. При записи перемежение отсчетов ИКМ-сигнала двух звуковых каналов производится с помощью схемы управления адресом ОЗУ. При этом отсчеты ИКМ-сигнала распределяются по соответствующим адресам ОЗУ согласно определенному стандартом алгоритму. За один оборот БВГ (30 мс) происходит заполнение ОЗУ отсчетами звуковых сигналов, причем одно ОЗУ содержит две области памяти, хранящие данные для двух ИКМ-зон дорожек. После заполнения ОЗУ начинается кодирование одной области памяти с помощью схемы кодера кода Рида-Соломона, в то время как значения отсчетов ИКМ-сигнала, поступающие из АЦП, продолжают заноситься по закону перемежения во второе ОЗУ. После подхода одной из головок к ленте закодированные данные одной из областей памяти считываются в усилитель записи и записываются на ленту, после чего начинается кодирование второй области памяти ОЗУ. Считывание на ленту происходит по последовательно перебираемым адресам ОЗУ.

При воспроизведении данные с усилителя воспроизведения по последовательным адресам заносятся в одну из областей ОЗУ. После прохода головки по ленте свободное время используется для декодирования записанных в ОЗУ данных одной дорожки с помощью схемы декодера. Ошибочные символы заменяются исправленными, флаги ошибок записываются на место проверочных символов. Затем, при подходе второй головки к ленте, процедура повторяется для второй области памяти ОЗУ. После цикла декодирования происходит считывание откорректированных данных в интерполятор и ЦАП, а в это время данные с ленты записываются и корректируются во втором ОЗУ. Формирование адресов при считывании сигнала в ЦАП из ОЗУ производится схемой управления адресом таким образом, чтобы обеспечить деперемежение звуковых отсчетов ИКМ-сигнала.

На процедуру кодирования или декодирования данных одной

дорожки отводится 7,5 мс (для угла охвата БВГ 90° при диаметре 30 мм). За этот период времени необходимо провести весьма сложные вычисления. Математические операции над кодовыми словами в коде Рида-Соломона осуществляются с помощью арифметики конечных полей, или полей Галуа. Число значений, которые могут принимать символы кода Рида-Соломона, ограничено значениями элементов конечного поля. В нашем случае, когда используются 8-разрядные символы, значения элементов поля ограничены 256. При любых арифметических вычислениях в поле Галуа значение результата этих вычислений всегда должно равняться одному из значений элементов поля.*)

Эффективность системы коррекции ошибок определяется не только мощностью примененных помехоустойчивых кодов, но и стратегией декодирования. Стратегия декодирования, определяющая алгоритм принятия решений при декодировании при наличии различных комбинаций ошибок и стираний, установки флагов стираний и ошибок, обуславливается, в свою очередь, спецификой возникновения ошибок для конкретного канала магнитной записи.

В общем случае система коррекции ошибок DAT-магнитофонов может иметь различные стратегии декодирования, заложенные различными разработчиками, одна из которых приведена на рис.56. Процедура декодирования начинается с вычисления синдрома ошибки для выбранного из памяти кодового слова. Если синдром равен нулю, ошибка отсутствует. В противном случае определяется, если это возможно, количество произошедших ошибок в кодовом слове и их местоположение (какие именно символы кодового слова ошибочны). Синдром ошибки вычисляется путем умножения кодового слова на проверочную матрицу данного кода. Эта и все другие арифметические операции выполняются по законам арифметики конечных полей. В первой ступени декодирования внутреннего кода C1 производится установка флагов (F) в зависимости от результата декодирования. В случае, если число ошибок в кодовом слове более двух, происходит отказ от декодирования, и все символы этого слова помечаются символами стирания (e).

Во второй ступени декодирования в зависимости от количества стираний e и ошибок s производится коррекция стираний и ошибок или же отказ от декодирования и установка флага, указывающего на ненадежность данных.

На рис.57 показан график эффективности системы коррекции с использованием двойного кода Рида-Соломона с указанной выше стратегией декодирования. По горизонтальной оси отложена вероятность возникновения ошибочных символов в канале, по вертикальной – вероятность возникновения ошибочных символов на выходе декодера системы коррекции.

---

*) Для знакомства с теорией арифметики полей Галуа и кодов Рида-Соломона следует обратиться к специальным источникам [51, 52, 53].

Декодирование С1

начало

вычислен. синдрома

обнаружение ошибок, очистка флагов (F0=F1=F2=0) N_i-кол-во ошибок

$N_i=0$ — да — нет коррекции

нет

$N_i=1$ — да — коррекция одиночной ошибки F0=1

нет

$N_i=2$ — да — коррекция двойной ошибки F0=F1=1

нет

F0=F1=F2=1

стоп

а)

Декодирование С2

начало

вычислен. синдрома

обнаружение ошибок N_i-количество ошибок

$N_i=2$ — нет — е-коррекция стираний + s-коррекция ошибок

e	s
0-2	2
3-4	1
5-6	0

да — коррекция 2 ошибок

кор? — да — коррекция, сброс флага F=0

нет — отказ от коррекции, установка флага ошибки F = 1

стоп

б)

Рис.56. Алгоритм декодирования: а) для внутреннего кода; б) для внешнего кода



Рис.57. Эффективность системы коррекции

Вероятность 10^{-3}, например, означает, что на 1000 непрерывно передаваемых символов будет один ошибочный. Нижняя кривая показывает способность системы коррекции к обнаружению ошибок, верхняя – способность к коррекции этих ошибок. На графике отмечены

уровни вероятности возникновения ошибочных символов на выходе декодера, соответствующие частоте возникновения "щелчков" на выходе магнитофона, вызванных ошибочными символами при непрерывном воспроизведении (один символ в секунду, один символ в минуту и т.д).

Можно видеть, что при такой малой вероятности ошибки, как один "щелчок" в день (при непрерывном воспроизведении), вероятность возникновения ошибочных символов в канале магнитной записи R-DAT составляет около 10^{-2}, т.е. на 100 символов – один ошибочный. При этом вероятность необнаруженной ошибки (которая не может быть скорректирована в интерполяторе) составляет около 10^{-17}. Эти данные показывают высокую эффективность примененной в R-DAT-магнитофонах системы коррекции ошибок.

Надо сказать, что данные субкода также защищаются от ошибок с помощью помехоустойчивого кодирования. Данные субкода первой и второй зон субкода дорожки кодируются с помощью одного внутреннего кода C1 Рида-Соломона. Перемежение кодовых слов, расположение проверочных символов кода идентично внутреннему коду, защищающему данные ИКМ-зоны. Дополнительная защита данных субкода может осуществляться с помощью программных средств – дублирования записываемой информации в обеих зонах субкода, повторения записи этой информации на протяжении определенного отрезка ленты и т.п.

КАНАЛ МАГНИТНОЙ ЗАПИСИ-ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

Канал магнитной записи-воспроизведения – это совокупность устройств, обеспечивающих при записи такое преобразование цифрового сигнала, которое необходимо для согласования его параметров с характеристиками элементов, участвующих в самом процессе магнитной записи, включая формирование токов записи в обмотках головок, а при воспроизведении – усиление считанного с ленты сигнала, его коррекции, формирование бинарного сигнала и выделение исходного цифрового сигнала. Канал магнитной записи-воспроизведения включает в себя модулятор-демодулятор канального кода, усилитель записи-воспроизведения, корректор, формирователь бинарного сигнала, схему ФАПЧ с детектором блоковой синхронизации.

Линейная плотность записи для всех режимов работы магнитофона одинакова и составляет 2,4 Кбит/мм (поверхностная плотность – 117 Кбит/мм^2), поэтому канал магнитной записи-воспроизведения реализуется в магнитофоне одинаково для любого режима. При высокоплотной записи возникает несколько серьезных проблем.

Одна из таких проблем – это снижение шумов и помех в канале записи-воспроизведения до необходимого уровня, при котором коэффициент ошибок составляет приемлемую величину. Уровень сигнала с магнитных головок составляет около 100–200 мкВ. Это предъявляет

жесткие требования к шумовым свойствам канала воспроизведения, работающего в широкой полосе частот. Шумы генерируются как неоднородностями носителя, так и всеми активными и пассивными элементами тракта воспроизведения: магнитной головкой, бесконтактным вращающимся трансформатором, усилителем воспроизведения и т.д.

Борьба с шумами в цифровом магнитофоне ведется традиционными способами: путем применения малошумящих усилительных схем, уменьшения шумового сопротивления пассивных элементов входных цепей, повышения эффективности магнитных головок. Кроме шумов свой вклад в увеличение коэффициента ошибок вносят перекрестные помехи с соседних дорожек записи. Уровень этих помех должен быть не выше уровня шумов ленты на тракте воспроизведения, и при этом он сильно зависит от спектрального состава записанного сигнала. Дело в том, что низкочастотные составляющие сигналов смежных дорожек слабо подавляются за счет взаимного наклона зазоров головок. Вид АЧХ головки при воспроизведении сигнала со смежной дорожки показан на рис.58. Для снижения уровня помех необходимо обеспечить отсутствие в сигнале записи низкочастотных компонент. Это желательно сделать еще и потому, что низкочастотные сигналы плохо воспроизводятся магнитными головками (АЧХ головок имеет спад на низких частотах с наклоном 6 дБ/окт) и плохо передаются через вращающийся трансформатор блока головок. Низкочастотные компоненты сигнала нарушают также работу схемы ФАПЧ. Уменьшение полосы частот записываемого сигнала за счет снижения низкочастотных компонент благоприятно сказывается на оптимизации характеристик записи в целом. Дело в том, что для каждого значения длины волны записи (или частоты сигнала) существует свое оптимальное значение тока записи, при котором отдача ленты максимальна. Для низких частот оптимальное значение тока записи больше, чем для высоких. Поэтому для сигнала с ограниченным в области низких частот спектром проще подобрать оптимальное значение тока записи, обеспечивающее максимальную отдачу ленты.

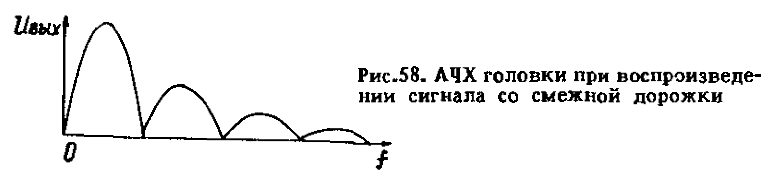


Рис.58. АЧХ головки при воспроизведении сигнала со смежной дорожки

Кроме того при воспроизведении цифрового двоичного сигнала, имеющего большой уровень низкочастотных составляющих, из-за дифференцирующего действия головки воспроизведения возникает сдвиг уровня сигнала. Так как скорость изменения сигнала в канале воспроизведения ограничена (фронты импульсов имеют наклон), возникает временная ошибка при восстановлении сигнала пороговым устройством, что может привести к неправильной регенерации сигнала (рис.59).

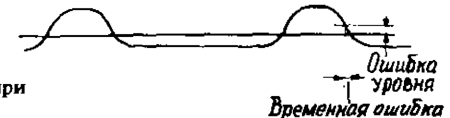


Рис.59 Сдвиг уровня сигнала при воспроизведении

Таким образом, снижение уровня низкочастотных составляющих в спектре записываемого на ленту сигнала становится важным комплексным требованием.

При высокоплотной записи встает проблема компенсации взаимодействия близлежащих участков намагниченности ленты при воспроизведении. Это взаимодействие возникает из-за конечной ширины зазора головки, который нельзя выполнить чрезмерно узким. К тому же при использовании одной магнитной головки для записи и воспроизведения приходится идти на компромисс при выборе значения ширины зазора, так как для записи желателен более широкий зазор головки, а при воспроизведении – как можно более узкий.

Для магнитных головок R-DAT ширина зазора составляет 0,25–0,3 мкм. При воспроизведении импульсы от соседних участков намагниченности накладываются друг на друга, и в результате их интерференции пики выходного сигнала головки сдвигаются относительно истинного положения центров импульсов, что приводит к временной ошибке (рис.60).

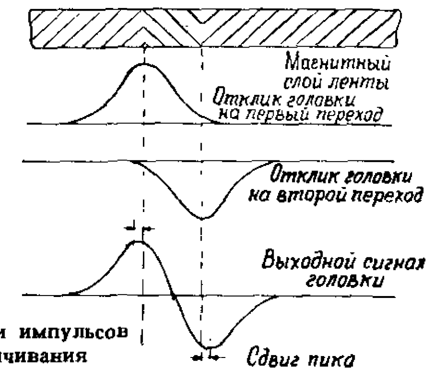


Рис.60. Влияние интерференции импульсов от соседних участков намагничивания

Для снижения влияния интерференции импульсов применяется специальный корректор, сжимающий импульсы воспроизведения. В одном из вариантов исполнения корректора используется пара линий задержки и суммирование выходных сигналов с линий задержки с определенными коэффициентами. На рис.61 приведена блок-схема корректора. Пара линий задержки используется для получения обгоняющего и запаздывающего сигналов по отношению к сигналу в центре. При инвертировании этих сигналов и добавлении их в определенной пропорции к центральному можно получить сжатый импульс. Сжатые

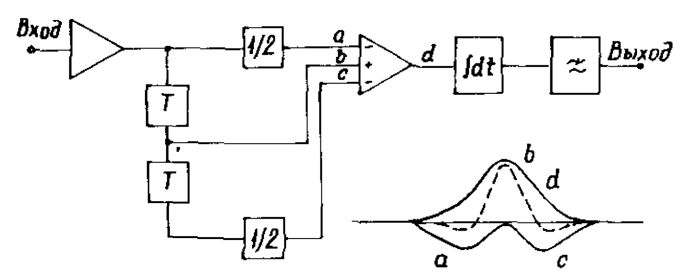


Рис.61. Блок-схема корректора канала воспроизведения и диаграмма, поясняющая его работу

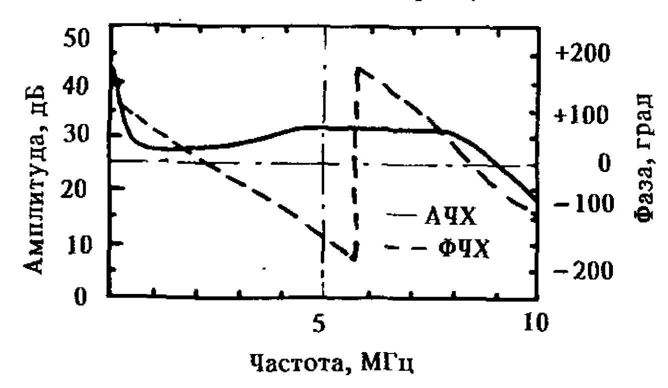


Рис.62 Амплитудно-частотная и фазово-частотная характеристики корректора

импульсы уже не перекрывают друг друга так сильно, и это уменьшает ошибку сдвига пиков. Интегратор используется для выравнивания АЧХ канала записи-воспроизведения, а ФНЧ уменьшает высокочастотные шумы. Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики корректора приведены на рис.62. Схема корректора может быть другой, лишь бы обеспечивалось надежное восстановление цифрового сигнала.

Большим недостатком реального канала является временная нестабильность положения импульсов, вызывающая их дрожание. Дрожание импульсов вызывается несколькими причинами. Шум ленты, шум канала воспроизведения, перекрестные помехи – все это вызывает случайное изменение амплитуды сигналов и приводит к смещению положения фронтов импульсов. Дрожание импульсов вызывается также неравномерностью движения ленты в тракте ЛПМ, особенно высокочастотными возмущениями, вызываемыми шероховатостью ленты, БВГ, изменением коэффициента трения направляющих и т.д.

Для обеспечения возможности восстановления цифрового сигнала необходимо, чтобы ширина временного интервала дрожания была меньше временного защитного интервала обнаружения импульса,

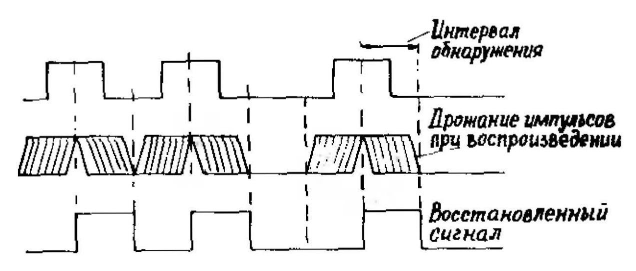


Рис.63. Влияние дрожания импульсов и ширины интервала обнаружения на восстановление цифрового сигнала

который определяется минимальной разницей между интервалами изменения полярности сигнала (рис.63). Чем больше интервал, тем меньше влияние интерференции импульсов, проще детектировать сигнал, и тем менее жесткие требования предъявляются к полосе пропускания канала записи-воспроизведения и к допустимым пределам дрожания импульсов воспроизводимого сигнала. В то же время для нормальной работы схемы ФАПЧ необходимо, чтобы переходы намагниченности на ленте следовали достаточно часто, то есть необходимо, чтобы воспроизводимый сигнал нес в себе регулярную информацию о продолжительности тактовых интервалов.

Таким образом, при высокоплотной цифровой магнитной записи к сигналу, записываемому на ленту, предъявляется ряд требований: малое содержание низкочастотных составляющих в спектре, достаточно широкий интервал обнаружения и способность к самосинхронизации при воспроизведении. Все эти проблемы могут быть разрешены при помощи соответствующего канального кода. Канальное кодирование преобразует двоичный сигнал данных в биты канала. Единице бита канала при этом соответствует изменение намагниченности ленты, а нуль не меняет состояния намагниченности ленты. Каждый бит имеет свою позицию, определяемую длительностью бита. Канальный код для R-DAT достаточно сложен, поэтому сначала рассмотрим более простые коды. На рис.64 изображен преобразуемый цифровой двоичный сигнал и два способа канального кодирования – частотная модуляция (ЧМ) (рис.64,*а*) и модифицированная ЧМ (МЧМ) (рис.64,*б*).

При ЧМ, чтобы передать один бит данных, необходимо иметь два бита канала. Первый из них всегда единица, так что в начале каждого битового интервала имеется изменение намагниченности ленты. Второй бит идентичен биту данных. Этот код, даже на первый взгляд, не оптимален, так как значение одного передаваемого бита всегда одно и то же. Скорость передачи бит увеличивается при этом вдвое, что вызывает необходимость расширения полосы частот записи.

При модифицированной ЧМ верхняя частота понижается, тем не менее система ФАПЧ надежно гарантирует синхроимпульсы, соответствующие битовым интервалам благодаря своей инерционности, что



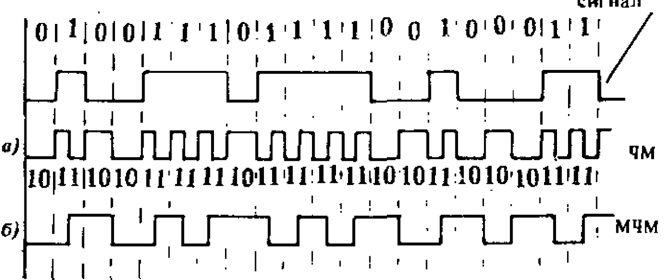


Рис.64. Способы канального кодирования с помощью кодов ЧМ и МЧМ

позволяет ей "проскакивать" через недостающие синхропереходы в течение короткого времени. Подобная технология применяется практически во всех устройствах цифровой магнитной записи, причем в начале каждого блока данных помещаются специальные синхропоследовательности, состоящие из чередующихся единиц и нулей, называемых "маркерами", "заголовками" и служащих для "вывода" ФАПЧ на требуемую частоту до того, как появятся данные. Изменение направления намагниченности в коде МЧМ осуществляется в центре битового интервала для "единицы" данных и на границах битовых интервалов – для соседних "нулей" данных. В этом коде по-прежнему необходимо иметь два бита канального кода для одного бита данных, но смежные биты канала никогда не бывают одновременно оба "единицами". Таким образом, минимальное время между переходами на ленте по сравнению с ЧМ удваивается, что позволяет увеличивать плотность записи на носителе. Заметим, что МЧМ применяется при записи данных на гибкие флоппи-диски в компьютерах.

Более совершенные канальные коды основываются на оптимальном преобразовании группы бит данных в последовательность бит канала. Эти коды используют таблицы преобразований, в которых любой возможной комбинации из m бит данных ставится в соответствие определенная комбинация из n канальных бит, причем n всегда больше m. Например, при разбиении цифрового сигнала данных в комбинации по 4 бита (m = 4), которые могут принимать 16 различных значений, им можно поставить в соответствие кодовые комбинации из 5 бит канала (n = 5), которые могут образовывать 2^5 = 32 комбинации. При этом выбираются лишь те комбинации, которые удовлетворяют поставленным условиям: отсутствие постоянной составляющей, большой интервал обнаружения (или окно детектирования) и т.д. Другие комбинации не используются. Конечно, чем больше отношение m/n, тем больше число бит в кодовом слове канала превышают число бит цифрового сигнала данных и тем легче выбрать нужные комбинации, например, с достаточно большим периодом между переходами, что позволило бы увеличить плотность записи. К сожалению, при этом

сужается окно детектирования сигнала, что в свою очередь уменьшает устойчивость сигнала к дрожанию импульсов за счет шума детонации.

Важным параметром канальных кодов является отношение $T_{макс}/T_{мин}$, где $T_{макс}$ – максимально возможный интервал между переходами, а $T_{мин}$ – минимальный временной интервал между переходами. Чем больше это отношение, тем больше может быть ассиметрия сигнала, приводящая к возрастанию низкочастотных составляющих в сигнале.

Таблица 10

$T_{мин}$	$T_{макс}$	$T_{макс}/T_{мин}$	$T_{дет}$	$\lambda_{мин}$, мкм	$\lambda_{макс}$, мкм
0,8T	3,2T	4	0,8T	0,67	2,67

Для записи цифровых сигналов на магнитную ленту в R-DAT-магнитофоне используется групповой канальный код 8–10 (m = 8, n = 10) с характеристиками, приведенными в табл.10. Здесь T – временной интервал одного бита данных (0,8 T равен одному периоду канальной частоты $f_{кан}$); $T_{мин}$ – минимальный временной интервал между переходами на ленте; $T_{макс}$ – максимальный временной интервал между переходами; $T_{дет}$ – окно детектирования (обнаружения); $\lambda_{мин}$ – минимальная длина волны записи; $\lambda_{макс}$ – максимальная длина волны записи.

Этот код не имеет постоянной составляющей. Частота передачи канальных бит несколько превосходит частоту передачи данных, но интервал обнаружения составляет 0,8T по сравнению, например, с 0,5T для МЧМ кода.

К сожалению, в комбинациях из n каналов бит нет достаточного числа последовательностей 8-битовых слов данных. Кроме того, чтобы улучшить характеристики при перезаписи и уменьшить сдвиг пиков импульсов из-за влияния низкочастотных компонент, необходимо ограничить максимальный интервал между переходами. В канальном коде 8–10 R-DAT разрешается последовательность не более чем из трех соседних нулей, что делает $T_{макс}$ лишь в 4 раза больше $T_{мин}$. Существует *лишь 153 10-битовых комбинаций (из 2^{10} = 1024 комбинаций)*, находящихся в пределах этой максимальной длины цикла и свободных от постоянной составляющей, для оценки которой в кодовых канальных словах используется так называемое цифровое значение суммы (ЦЗС).

Для каждого интервала бита, когда ток в головке идет в одном направлении, к значению суммы добавляется "1", а для каждого интервала, когда он идет в обратном направлении, единица вычитается из суммы. Ясно, что сигналы типа меандра имеют ЦЗС равное нулю, так как они имеют одинаковое число переходов в прямом и обратном направлениях. Ассиметричные сигналы могут иметь нулевое ЦЗС.

Остающиеся 103 комбинации данных (256 – 153 = 103) записываются с помощью комбинаций из канальных бит, имеющих ненулевое ЦЗС. Причем каждой 8-разрядной комбинации данных соответствует две комбинации канального кода. Одна из них имеет ЦЗС, равное +2, а другая – ЦЗС, равное –2. Разница между двумя этими комбинациями заключается в том, что бит первого интервала инвертируется. Значения всех остальных бит остаются неизменными.

Таблица 11

Слово данных	Кодовое слово	ЦЗС	Дополнительное кодовое слово	ЦЗС
00000000	0101010101	0		
00000001	0101010111	0		
00010000	1101010010	0		
00010001	0100010010	2	1100010010	–2
00010010	0101010010	0		
00010011	0101110010	0		
00010100	1101110001	2	0101110001	–2
00010101	1101110011	2	0101110011	–2
00010110	1101110110	2	0101110110	–2
00010111	1101110010	0		

В табл.11 приведено несколько примеров кодовых комбинаций кода 8–10. Комбинация с ЦЗС = +2 или ЦЗС = –2 выбирается на основе значения ЦЗС предыдущего кода. Например, если среди нескольких битов, которым соответствуют слова канального кода с нулевым ЦЗС, попался байт, которому соответствует слово с ЦЗС = +2, ЦЗС всей последовательности станет равной +2. При появлении первого канального слова с нулевым ЦЗС будет выбрано слово с ЦЗС = –2, чтобы скомпенсировать постоянную составляющую. Чтобы уменьшить сложность кодирования, выбор кодовых групп определенным образом оптимизируется с помощью математического моделирования на ЭВМ. Устанавливается определенная логическая связь между данными и кодовыми группами, что позволяет вместо постоянных запоминающих устройств большого объема использовать при построении модулятора-демодулятора канального кода программируемые логические матрицы (ПЛМ).

С помощью ПЛМ данные преобразуются в кодовые последовательности с ЦЗС = 0 и ЦЗС = +2. Последовательности с ЦЗС = –2 можно легко получить путем инвертирования первого бита кодового слова. Однако ЦЗС кодовых слов производится путем проверки на четность пяти бит кодовой 10-разрядной последовательности. Если пять четных бит канального слова при проверке на четность дают единицу, то это слово может иметь ЦЗС = 0; ±4; ±8 ... Если результат проверки нуль, то

$$a = A + CZ + Y(\bar{C} \oplus \bar{F}(G + H))$$
$$b = A(B + D\bar{E}) + \bar{A}(\bar{B} + \bar{C})$$
$$c = \bar{A}C + A(\bar{D} + E) + BDE$$
$$d = A(C + BD\bar{E}) + CDE + \bar{C}Z + (\bar{A}\bar{B} \oplus \bar{F}\bar{G}HY)$$
$$\bar{e} = (AB + \bar{D})\bar{E} + \bar{A}\bar{B}CDE + Y\bar{F}(\bar{G} + \bar{H})$$
$$f = \bar{A}\bar{E}(C + (B \oplus D)) + ((\bar{D} + C\bar{E}) \oplus F(\bar{G} + \bar{H}))$$
$$\bar{g} = \bar{F}\bar{G} + Y + (B + C)Z$$
$$h = FG\bar{H} + \bar{F}\bar{Y}$$
$$i = H + FG + \bar{F}Y$$
$$j = F\bar{G} + \bar{F}Y,$$
где $Y = \bar{A}(\bar{B} + C)D\bar{E}$ $Z = \bar{A}\bar{D}\bar{E}F(\bar{G} + \bar{H})$

Рис.65. Таблица кодирования ПЛМ для кода 8–10

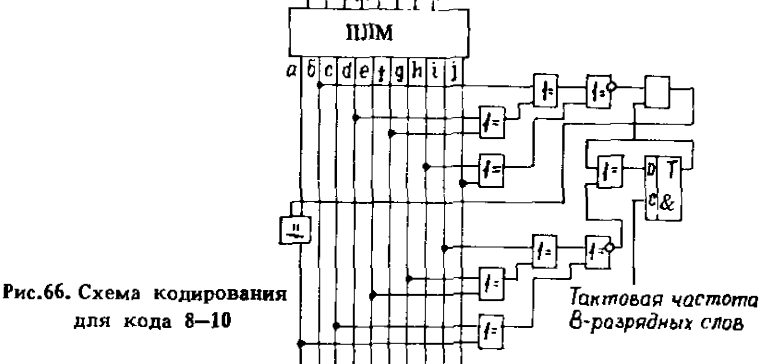


Рис.66. Схема кодирования для кода 8–10

ЦЗС может принимать значения ±2; ±6; ±10. Однако, на выходе ПЛМ могут появляться лишь последовательности с ЦЗС = 0 или +2, поэтому результат проверки на четность определяет, какая последовательность присутствует на выходе ПЛМ. На рис.65 приведена таблица кодирования ПЛМ, а на рис.66 – схема кодирования.

Верхняя группа схем "исключающее ИЛИ" определяет, с каким ЦЗС поступает кодовая последовательность. Если это последовательность с ЦЗС = 0, на одном из выходов схемы "И" появляется "0", и старший бит кодовой последовательности передается без изменений. Если ЦЗС передаваемой последовательности равно +2, то на выходе схемы "И" появляется разрешающая "1". При этом инвертирование старшего бита "a" с помощью схемы "исключающее ИЛИ" будет осуществляться, если в триггере запомнена "1", то есть, если предыдущая последовательность имела ЦЗС = +2. Бит четности, запоминаемый в триггере, вырабатывается нижней группой схем "исключающее ИЛИ".

Декодирование последовательностей при воспроизведении осуществляется также при помощи ПЛМ и реализуется несколько проще, потому что имеется прямая связь между 10-битовыми канальными словами и 8-разрядными данными. Спектры сигнала, представляющего собой псевдослучайную последовательность, промодулированные кодом 8–10, показаны на рис.67 и 68.

Генерация тактовой канальной частоты, период которой равен интервалу длительности одного бита, осуществляется с помощью схемы ФАПЧ. Схема ФАПЧ содержит фазовый дискриминатор (ФД), выделяющий ошибку фазы между входными импульсами данных и опорной частотой, схему демпфирования, преобразующую ошибку фазы в напряжение, которое изменяет частоту генератора управляемого напряжения (ГУН).

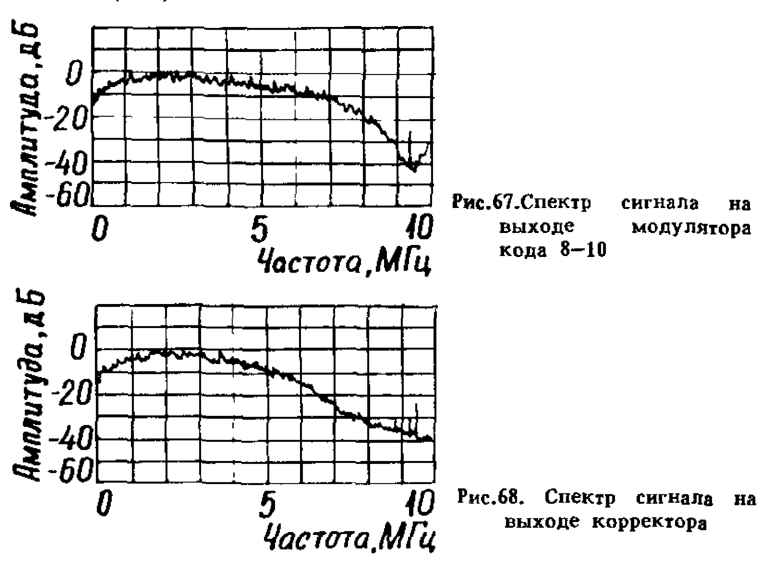


Рис.67. Спектр сигнала на выходе модулятора кода 8–10

Рис.68. Спектр сигнала на выходе корректора

Опорная частота с выхода ГУН поступает на один из входов ФД. Сигнал обратной связи стремится установить на выходе ФД нулевую ошибку фазы. При этом частота, генерируемая ГУН, становится равной тактовой частоте входного сигнала. Если между ГУН и ФД поместить делитель, как показано на рис.69, то частота ГУН будет больше входной базовой частоты данных в число раз, определяемое коэффициентом деления счетчика.

Если в качестве входного сигнала используется цифровой сигнал, то ФАПЧ будет производить сравнение фазы при появлении перехода (соответствует "1" канального кода). При входных канальных последовательностях, содержащих "нули" (в цифровом сигнале отсутствуют переходы), ФАПЧ не будет осуществлять управление ГУН, сохраняя

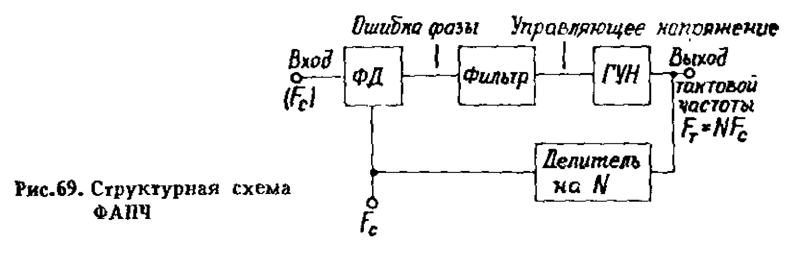


Рис.69. Структурная схема ФАПЧ

значение частоты, соответствующее последней фазовой ошибке, до тех пор, пока не встретится переход в цифровом сигнале. Таким образом, подсчитывая число периодов канальной частоты, можно определить число "нулей" между переходами, которым соответствует "1", и осуществить восстановление цифровых данных. Рис.70 иллюстрирует это. На

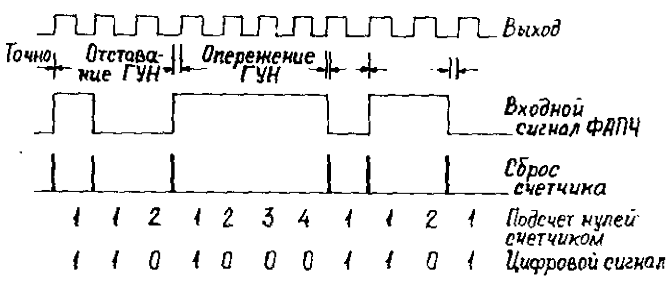


Рис.70. Восстановление цифрового сигнала с помощью ФАПЧ

вхождение ФАПЧ в синхронизм (или режим захвата опорной входной частоты) требуется определенное время. Чем больше постоянная времени петли ФАПЧ, тем дольше она входит в синхронизм, но тем устойчивее работает при длинных последовательностях "нулей". Конечно, в любом случае данные не могут быть восстановлены сразу при появлении блока данных. Для ввода ФАПЧ в синхронизм перед данными размещаются последовательности, не несущие информации и содержащие максимальное число переходов. Для системы DAT – это маркеры дорожек, заголовки перед зонами субкода и ИКМ-зоной. Для правильного восстановления данных важно знать, когда кончается заголовок и начинаются данные. При последовательной записи данных на ленту отсчеты ИКМ-сигнала записываются побитно, без промежутков между битами и словами. Если точное положение первого бита неизвестно, то тогда невозможно разместить все биты в нужных местах каждого слова. Эффект ошибки синхросдвига в 1 бит соответствует выпадению сигнала, потому что несоответствие в 1 бит между счетом бит данных и потоком двоичных символов исказит каждое слово в блоке. Поэтому в начале каждого блока данных необходимо помещать специальную синхрогруппу, которая опознается детектором блоковой синхронизации. Детектор блоковой

синхронизации устанавливает счетчик бит в исходное состояние и отмечает начало цифрового потока каждого блока импульсом синхронизации, служащим для правильного восстановления порядка бит в словах и символах. В качестве синхрогрупп применяются 10-разрядные канальные последовательности, которые никогда не встречаются в последовательностях данных, промодулированных кодом 8–10. Поэтому их можно надежно обнаруживать. Для защиты от случайных ошибок, выпадений, приводящих к потере синхрогруппы, служит специальная схема защиты от выпадений, вырабатывающая импульс, соответствующий месту синхрогруппы при ее отсутствии и неправильном детектировании. Схема защиты от выпадений подавляет также ложные импульсы блоковой синхронизации, выдаваемые детектором при случайных ошибках в данных, из-за которых канальные последовательности данных становятся похожими на синхрогруппу. В табл.12 приведены синхрогруппы для кода 8–10, выбираемые в соответствии с предыдущим значением ЦЗС кодового слова.

Таблица 12

Кодовое слово	ЦЗС	Кодовое слово	ЦЗС
0100010001	0	1100010001	0

СИСТЕМА АВТОТРЕКИНГА

Система автотрекинга обеспечивает правильное следование магнитных головок по траекториям дорожек записи. Необходимость такой системы возникает из самой сути примененного способа азимутальной записи: запись производится двумя магнитными головками со взаимноперекошенными зазорами, причем ширина головок в 1,5 раза шире дорожки записи. При этом необходимо обеспечить попадание каждой головки на свою дорожку, имеющую такой же наклон магнитных штрихов, как и наклон зазора головки. Так как ширина дорожки чрезвычайно мала – 13,591 мкм, необходимо обеспечить такую ошибку следования головки по дорожке, которая бы не вызывала увеличения вероятности появления ошибок в канале воспроизведения. Вероятность появления ошибок зависит от соотношения сигнал-помеха, определяемого, с одной стороны, шумами ленты, головок, усилителя воспроизведения, а с другой стороны – уровнем перекрестных помех с соседних дорожек. Шумы от положения головки не зависят. До некоторой степени на зависит от положения головки и отношение сигнал-перекрестная помеха, определяемое суммой помех с примыкающих дорожек записи. Так как головки в 1,5 раза шире дорожек записи, допускается смещение

их относительно середины дорожки записи, лишь бы головка полностью захватывала свою дорожку записи. При этом уменьшение перекрестной помехи с одной дорожки компенсируется увеличением помехи с другой дорожки. Если же головка будет смещена еще дальше в сторону так, что она не будет захватывать полностью нужную дорожку записи, уровень полезного сигнала упадет, и отношение сигнал-помеха понизится, что приведет к возрастанию ошибок в канале.

Таким образом, если считать идеальным такое положение головки, когда ее центр совпадает с центром дорожки записи, допустимая ошибка следования по дорожке может достигать примерно ±5 мкм. Так как в реальной системе автотрекинга всегда существует некоторая погрешность установки головок на дорожке записи, подобная зона нечувствительности увеличивает устойчивость системы к различного рода возмущающим воздействиям и обеспечивает ее высокую эффективность. Рис.71 иллюстрирует зависимость отношения сигнал-помеха от ошибки слежения головки за дорожкой.

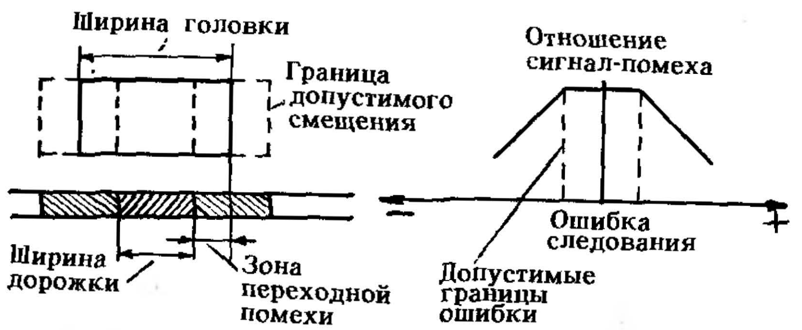


Рис.71. Допустимая ошибка слежения и зависимость отношения сигнал-помеха от ошибки слежения

Каким образом осуществляется слежение головки за траекторией дорожки записи?

Исполнительным органом системы автотрекинга является ведущий вал. Управляя частотой вращения дигателя ведущего вала, можно управлять положением головки на дорожке записи. Например, если ведущий вал будет несколько быстрее тянуть ленту, головка при ее подходе к дорожке окажется "выше" дорожки, если же частота вращения ведущего вала будет меньше, то головка может оказаться "ниже" дорожки записи (рис.72).

Система автотрекинга обеспечивает такое изменение скорости движения ленты, чтобы по мере вращения БВГ и подхода к ленте головки начало дорожки точно совпало с центром головки, сканирующей по этой дорожке. Таким образом, значение линейной скорости устанавливается автоматически. Если в R-DAT-магнитофон поставить кассету с предварительной (студийной) записью, выполненной в режиме широкой

дорожки, система автотрекинга автоматически установит значение скорости, равное 12,25 мм/с. Система автотрекинга обеспечивает полную взаимозаменяемость записей, сделанных на разных магнитофонах. Если средняя скорость движения ленты магнитофона, на котором выполнялась запись, несколько отличалась от номинальной, система автотрекинга другого магнитофона при воспроизведении этой записи установит нужное значение скорости движения ленты. Некоторое искривление дорожек записи, возникающее из-за неправильной регулировки ЛПМ, может быть скомпенсировано при воспроизведении на другом магнитофоне благодаря наличию "запаса" по ошибке слежения, о котором говорилось выше.

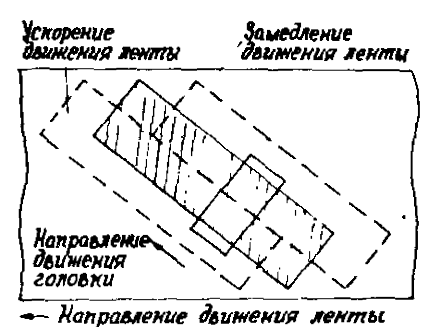


Рис.72. Управление положением головки на дорожке записи с помощью ведущего вала

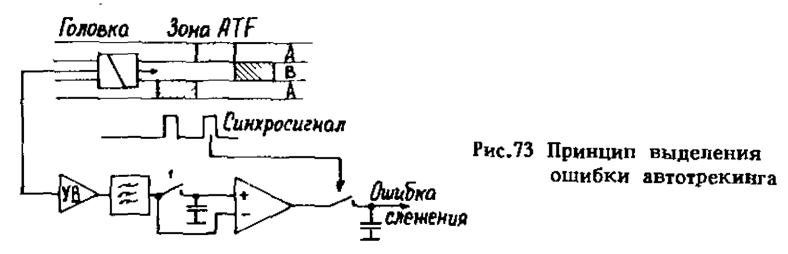


Рис.73 Принцип выделения ошибки автотрекинга

Как выделяется ошибка слежения за дорожкой, которая управляет скоростью движения ленты?

При достаточно широких дорожках записи (например, в бытовой видеозаписи) для выделения этой ошибки используется специальная продольная дорожка, на которую записывается неподвижной головкой синхросигнал, импульсы которого "отмечают" положение дорожек на ленте. При воспроизведении эти импульсы считываются неподвижной головкой и сравниваются с импульсами, генерируемыми датчиками положения БВГ, размещение которого жестко связано с положением одной из головок. Фаза импульсов синхродорожки сравнивается с фазой импульсов с датчика положения, а разность служит для управления двигателем ведущего вала. Но для высокоплотной записи R-DAT этот метод неприемлем. Ошибки, неизбежные при юстировке неподвижной головки, и различного рода возмущения, действующие на магнитную

ленту при ее движении, вызывали бы недопустимые ошибки слежения за узкими дорожками записи. К тому же дополнительная неподвижная головка увеличивала бы габариты ЛПМ.

В R-DAT-магнитофоне ошибка слежения вырабатывается при считывании вращающимися головками специальных сигналов с соседних дорожек записи, записанных в зонах дорожки, лежащих до и после ИКМ-зоны (ATF) (см. рис. 44).

В каждой зоне ATF записывается так называемый пилот-тон, по которому определяется ошибка слежения. Частота пилот-тона выбирается низкой (примерно 130 кГц) для того, чтобы наклон зазора головок слабо влиял на подавление этого сигнала. Поэтому магнитная головка прекрасно считывает пилот-тон не только со своей дорожки, но и со смежных. Расположение пилот-тона на дорожке записи в зоне ATF выбрано таким образом, чтобы при проходе головки не происходило одновременного считывания пилот-тона с разных дорожек. Рис.73 поясняет принцип выделения ошибки слежения.

При проходе головкой зоны ATF происходит считывание сигналов пилот-тона с соседних дорожек и запоминание уровня каждого из них с помощью устройств выборки-хранения. Необходимые импульсы стробирования, управляющие устройствами выборки-хранения, вырабатываются схемой управления в ответ на считывание специального сигнала синхронизации, записываемого в зоне ATF. Положение этого синхросигнала жестко связано с положением сигналов пилот-тона на смежных дорожках записи. Для каждой из головок существует синхросигнал своей частоты, благодаря чему каждая головка следит за своей дорожкой записи. В состав схемы выделения ошибки слежения входит также дифференциальный усилитель, выделяющий разность уровней сигналов пилот-тона со смежных дорожек. Если головка проходит по дорожке точно (центр головки совпадает с центром дорожки), уровни сигналов, считанных со смежных дорожек, будут одинаковыми, и ошибка слежения соответственно будет равна нулю (рис.74,*а*). При смещении головки в какую-либо сторону возрастает уровень считанного пилот-тона с той дорожки, в сторону которой смещена головка, и снижается уровень сигнала с противоположной дорожки записи. Разность уровней выделяется и подается на схему управления

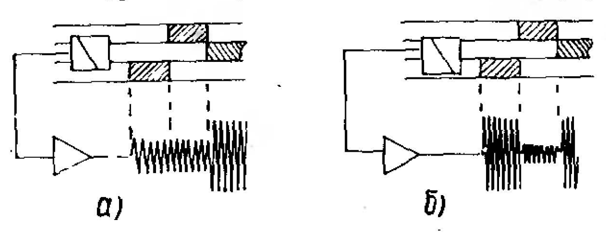


Рис.74. Считывание сигналов пилот-тона при точной (*а*) и неточной (*б*) установке головок на дорожке

двигателем ведущего вала, которая замедляет или ускоряет вращение вала в зависимости от величины и знака ошибки (рис. 74,б).

Расположение сигналов автотрекинга на дорожке для нормального режима (скорость движения ленты – 8,15 мм/с) показано на рис.75. Промежутки между синхросигналами, пилот-тоном и данными заполняются с помощью сигнала стирания ($F_{ст}$). Частота пилот-тона $F_{пил}$ равна 130,67 кГц, сигнала стирания – 1,568 МГц, синхросигнала F_{C1} дорожки А (записывается головкой с "плюс" азимутом) – 522,67 кГц, синхросигнала F_{C2} дорожки В ("минус" азимут) – 784,00 кГц. Такие значения частот выбраны для удобства их формирования при записи. Дело в том, что все эти значения кратны тактовой канальной частоте $F_{кан}$ = 9,408 МГц, период которой равен длительности одного канального бита кода 8–10. Для получения сигналов автотрекинга необходимо поделить $F_{кан}$ на целое число. Частота пилот-тона $F_{пил} = F_{кан}/72$, $F_{C1} = F_{кан}/18$, $F_{C2} = F_{кан}/12$, сигнала стирания – $F_{ст} = F_{кан}/6$.

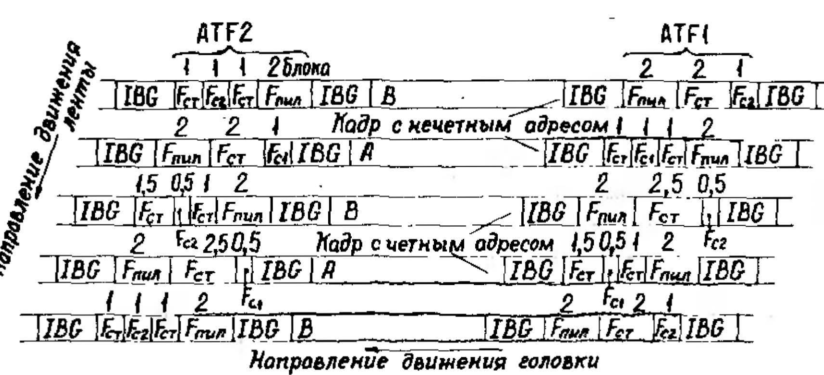


Рис.75. Расположение сигналов автотрекинга на дорожках записи (скорость движения ленты – 8,15 мм/с; *А* – наклон зазора головки +20°; *В* – наклон зазора головки –20°

При прохождении головкой А своей дорожки считывается пилот-сигнал основной дорожки, за которым следует пилот-сигнал одной и затем другой смежных дорожек В. Когда головка В входит в контакт со своей дорожкой, она считывает пилот-сигнал "верхней" дорожки А, затем пилот-сигнал "нижней" дорожки А и, наконец, пилот-сигнал своей дорожки. Ошибка слежения в этом случае извлекается из двух предыдущих дорожек для головки А. Система легко различает, какой из режимов обработки принять, поскольку синхросигналы имеют различную частоту в зависимости от дорожки (А или В).

Для управления режимом синхронизации используется датчик положения БВГ, импульсный сигнал на выходе которого сигнализирует о подходе одной из головок (например, А) к ленте. В зависимости от состояния этого сигнала усилитель воспроизведения подключается к

выходу головки А или В, а схема управления устройствами выборки-хранения, формирующими сигнал ошибки слежения – к детектору синхросигнала 522 и 784 кГц. Схема слежения при обнаружении синхросигнала вырабатывает сначала один импульс, по которому запоминается уровень сигнала с первой смежной дорожки, а затем с задержкой другой – для запоминания уже разности уровней пилот-сигнала соседних дорожек. Для повышения надежности работы системы слежения задержка выбирается такой, чтобы запомнить середину сигнала.

При записи сигнал положения головок используется для формирования временных сигналов, необходимых, в свою очередь, для записи сигналов автотрекинга.

Существует еще одна проблема, которую необходимо решать для обеспечения надежной работы системы автотрекинга: ввиду наличия флуктуаций амплитуд пилот-сигналов при воспроизведении из-за неконтакта, загрязнения, разной чувствительности головок возможно изменение коэффициента передачи системы слежения, что может привести к недопустимой ошибке.

Для решения этой проблемы в канал выделения ошибки автотрекинга введена автоматическая регулировка усиления (АРУ). В качестве опорного сигнала АРУ используется сумма пилот-сигналов соседних дорожек, которая и определяет напряжение АРУ.Устройства выборки-хранения запоминают параметр АРУ для каждой головки. После фильтрации сигнал с устройства выборки-хранения подается на усилитель с регулируемым коэффициентом усиления, осуществляющим предварительное усиление сигналов пилот-тона. С выхода этого усилителя сигналы пилот-тона поступают на схемы выделения ошибки слежения. При уменьшении уровня сигналов пилот-тона, воспроизводимых с ленты, уменьшается сигнал на выходе устройства выборки-хранения АРУ, что приводит к возрастанию коэффициента усиления усилителя. Таким образом, уровень пилот-тона на входе схемы выделения ошибки слежения поддерживается постоянным для каждой головки.

Поэтому головки могут быть разной чувствительности, что облегчает их массовое производство и делает систему автотрекинга менее чувствительной к загрязнению головок и ленты.

Еще одна проблема, возникающая при перезаписи фонограмм – обеспечение надежного стирания сигналов пилот-тона старой записи. Длинноволновые сигналы на магнитной ленте стираются при новой записи хуже, чем коротковолновые. Так как пилот-тон с частотой 130 кГц образует самые длинноволновые сигналы при записи на магнитной ленте, уровень его стирания новым пилот-тоном может быть недостаточным, что приводит к дополнительной ошибке слежения за дорожкой записи. Поэтому необходимо при записи устанавливать ток, обеспечивающий такой остаточный уровень пилот-тона старой записи, чтобы он не оказывал влияния на ошибку слежения.

Кроме стандартного режима слежения система автотрекинга обеспечивает слежение в режимах подмотки ленты вперед и назад. Этот режим используется для нахождения нужного участка записи путем прослушивания фонограммы на ускоренной (в 2-3 раза больше обычной) скорости воспроизведения. При этом головки не считывают полностью свои дорожки, а сканируют по нескольким дорожкам записи, пересекая их. Это неизбежно приводит к потере части данных ИКМ-зоны, восстанавливаемых с помощью интерполяции. При нехватке данных возникают также коррекции по умолчанию. Обычно при этом уровень воспроизводимого сигнала специально понижается на –12 дБ или менее. Качество воспроизведения в этом режиме достаточно для нахождения нужной точки записи. Система автотрекинга в этом режиме устанавливает головки на начало своих дорожек. При этом изменяется алгоритм работы схемы формирования управляющих импульсов для УВХ ошибки слежения. В зависимости от скорости подмотки между собой сравниваются сигналы пилот-тона от разных дорожек и даже в разных зонах дорожек.

СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИФРОВОГО МАГНИТОФОНА

СЕРВИСНЫЕ ФУНКЦИИ

Как уже упоминалось, R-DAT-магнитофоны существенно превосходят обычные в части сервисного обеспечения. Одним из главных преимуществ его является возможность очень быстрого поиска нужного фрагмента записи. Важное отличие R-DAT-магнитофонов от аналоговых моделей заключается в том, что система обеспечения его сервисных функций базируется на записи на ленту специальных управляющих и информационных сигналов. Поэтому поиск участка записи, индикация времени воспроизведения и т.п. может осуществляться с надежностью, недостижимой для аналоговых магнитофонов.

Практически все выпускамые модели R-DAT-магнитофонов обладают возможностью непосредственного выбора программ, записанных на ленте и соответствующим образом пронумерованных. С помощью специальной клавиатуры может быть набран номер желаемой программы и включена система поиска. Число программ, которое можно выбрать в конкретных моделях, колеблется от 16 до 99. Начало каждого фрагмента отмечается записью специального стартового кода "Start ID", записываемого в зоне субкода в течение 8–10 с. Вместе с ним записывается и номер фрагмента. Запись кода "Start ID" может осуществляться как вручную (с помощью нажатия соответствующей клавиши), так и в автоматическом режиме. В последнем случае запись стартового кода

осуществляется при наличии сигнала после более чем 3-х-секундной паузы (длительность паузы может зависеть от конкретной модели).

В зоне субкода может быть также код пропуска "Skip ID", с помощью которого потребитель может отмечать нежелательные музыкальны отрывки, которые он хотел бы исключить при воспроизведении. При включении режима воспроизведения с пропусками отрезок записи, начало которого отмечено кодом "Skip ID", а концом является начало следующего фрагмента, отмеченное кодом "Start ID", пропускается при воспроизведении. Таким образом можно осуществлять гибкое программирование процесса воспроизведения. Многие магнитофоны позволяют перед воспроизведением запрограммировать последовательность воспроизведения музыкальных номеров, записанных на кассете, с возможностью повторения отдельных фрагментов или всей программы. Кроме того, потребитель имеет возможность самостоятельно стирать и записывать коды "Start ID", "Skip ID", ставить номера фрагментов. Для упорядочения номеров фрагментов применяется режим перенумерации, включаемый нажатием одной кнопки. Необходимость такой операции может возникнуть при записи на часть кассеты новой программы. При перенумерации нарушенная последовательность номеров восстанавливается автоматически, при этом фрагментам присваиваются номера, соответствующие порядку расположения их на ленте. Кроме режима непосредственного выбора существует функция автоматического музыкального поиска (AMS). Нажимая клавишу ►►| или |◄◄ определенное число раз, можно "перепрыгнуть" вперед или назад через определенное число музыкальных фрагментов, и при этом найденный фрагмент воспроизводится с начала. Наличие совсем чистых мест на ленте между фрагментами приводит к резкому снижению скорости поиска в связи с тем, что из-за отсутствия управляющих сигналов на ленте эти места проходятся в замедленном темпе. Поэтому R-DAT-магнитофоны имеют специальную функцию поиска чистой зоны ленты. Перед каждой новой записью на кассету эта функция позволяет находить конец предыдущей записи, и лента останавливается таким образом, чтобы при новой записи возможность возникновения чистых мест была исключена. Когда лента в кассете кончается, управляющая схема ЛПМ перематывает ленту в исходное положение и переводит механизм в режим "Стоп".

Во многих моделях имеется функция обзора записанной программы. При включении ее первые 8–10 секунд воспроизводится начало каждого фрагмента, после чего лента перематывается до следующего фрагмента, отмеченного стартовым кодом "Start ID".

Кроме стартового кода и кода пропуска в зоне субкода записывается информация о текущем времени с начала записи или воспроизведения (в часах, минутах и секундах), о времени звучания каждого фрагмента записи и времени, оставшемся до конца ленты. Вся эта информация выводится на многофункциональный индикатор. На

этом же индикаторе отмечается номер программы, номер фрагмента, отыскиваемого в режиме поиска, режим работы магнитофона (частота дискретизации, с которой он в данный момент работает) и многое другое. Индикатор показывает уровни сигналов в правом и левом каналах. Так как при цифровой записи даже небольшие превышения максимального уровня преобразования АЦП могут привести к заметным искажениям, используются пиковые индикаторы уровня записи с высоким разрешением и большим динамическим диапазоном.

Стандартом предусмотрена запись на ленту в зоне субкода оглавления, в котором обеспечивается время выполнения записи, количество произведений, записанных на ленте, их порядковые номера и время звучания каждого из них. Для удобства пользования оглавление может записываться в нескольких местах ленты.

Емкость субкода позволяет записывать на ленту также графическую информацию, неподвижные изображения. Поэтому с помощью специального устройства (адаптера) R-DAT-магнитофон можно подключать к телевизору, на экране которого при воспроизведении музыкальной программы будут возникать различные графические образы, изображения исполнителей и т.п. На экран телевизора удобно выводить информацию оглавления, которая может включать названия произведений, имена исполнителей, авторов, жанр музыкального произведения и т.д. Устройство сопряжения магнитофона с телевизором должно обладать при этом достаточно большим объемом памяти, способным запомнить информацию, соответствующую кадру изображения. Неподвижные изображения высокого качества, записанные в зонах субкода, могут меняться на экране через каждые 20—40 с.

Кроме зон субкода дополнительная информация может записываться также в зонах кода идентификации, занимающего два байта в начале каждого блока данных в ИКМ-зоне. Обязательная информация, автоматически записываемая в зоне кода основной идентификации, включает в себя сведения о частоте дискретизации и разрядности квантования, с которыми была выполнена запись, о числе каналов, о режиме воспроизведения (нормальная или широкая дорожки), о наличии предыскажений. Предыскажения могут использоваться в случае студийной записи для дополнительного усиления верхних частот

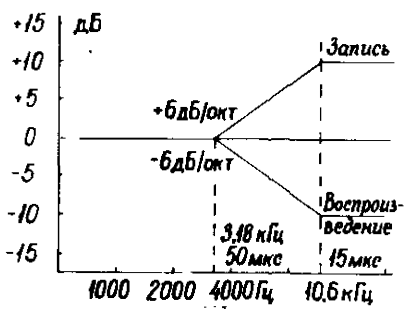


Рис.76. АЧХ предыскажений при записи и коррекции при воспроизведении

перед аналого-цифровым преобразованием, что улучшает отношение сигнал-шум. АЧХ предыскажений показана на рис.76. При наличии информации о предыскажениях для получения равномерной частотной характеристики на выходе магнитофона включается соответствующая корректирующая цепочка. В зоне кода ID записывается информация о разрешении или запрете цифрового кодирования фонограммы. Если установлен бит запрета, цифровое копирование этой записи на другой магнитофон невозможно. Так как вся эта информация записана вместе с ИКМ-сигналом, то переписать ее, не стерев данные звукового сигнала, невозможно в отличие от зон субкода, которые могут переписываться независимо от ИКМ-зоны.

ЛЕНТОПРОТЯЖНЫЙ МЕХАНИЗМ И СИСТЕМА СЕРВОУПРАВЛЕНИЯ

Лентопротяжный механизм цифрового магнитофона обеспечивает загрузку кассеты, заправку и транспортирование ленты, сканирование магнитных головок и передачу сигнала от усилителя записи-воспроизведения к БВГ.

Траектория движения ленты в ЛПМ R-DAT-магнитофона показана на рис.77. Пунктиром показано расположение стоек и прижимного ролика до начала заправки ленты.

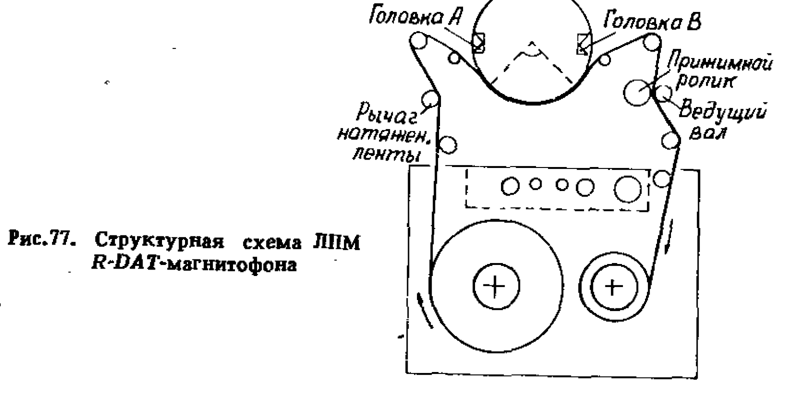


Рис.77. Структурная схема ЛПМ *R-DAT*-магнитофона

После загрузки кассеты механизм заправки ленты перемещает стойки в рабочее положение. При этом стойки захватывают ленту и обеспечивают ее заправку на блок головки. Прижимной ролик останавливается в промежуточном положении, несколько не доходя до ведущего вала. При поступлении команды на воспроизведение механизм заправки ленты доводит прижимной ролик до контакта с ведущим валом, обеспечивая транспортирование ленты. При выгрузке кассеты из

ЛПМ происходит обратный процесс: стойки и прижимной ролик возвращаются в исходное положение, а петля ленты сматывается при вращении одной из катушек кассеты.

Кроме подвижных стоек ЛПМ имеет и неподвижные направляющие стойки, а также рычаг датчика нажатия ленты, занимающий рабочее положение при заправке ленты.

Наиболее отвественным узлом ЛПМ является блок вращающихся головок. Практически все БВГ как в бытовой видеозаписи, так и в R-DAT-магнитофонах выполнены по типовой схеме: блок головок состоит из двух барабанов, один из которых (нижний) является неподвижным, а верхний вращается вместе с магнитными головками, укрепленными у его нижней кромки. На неподвижном барабане имеется направляющий выступ по всей длине контакта барабана с лентой, который фиксирует положение ленты (рис.78).

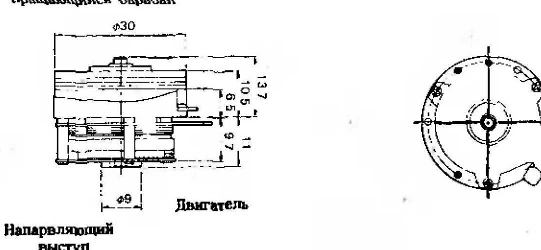


Рис.78. БВГ *R-DAT*-магнитофона

Вращающийся вместе с головками с большой скоростью барабан создает тонкую воздушную подушку между лентой и поверхностью БВГ. Благодаря ей трение значительно снижается и становится практически независимым от качества поверхности. Трение снижается не только на вращающейся, но и на неподвижной части барабана за счет засасывания воздуха под ленту. В некоторых конструкциях БВГ для облегчения создания воздушной подушки на поверхности вращающегося барабана выполнены кольцевые канавки. Тем не менее, все это реализуется только в рабочем режиме барабана блока вращающихся головок (при его вращении). При заправленной ленте запуск барабана блока может быть затруднен вследствие повышенного коэффициента трения, например, в случае отпотевания поверхности БВГ при повышенной влажности, что вызывает прилипание ленты к ней. Изменение натяжения ленты, возникающее из-за изменения коэффициента трения, может привести или к деформации ленты, или даже к остановке ЛПМ и поломке головок. Чтобы избежать этого, вблизи БВГ устанавливается датчик влажности. При определенной влажности сигнал от датчика вызывает отключение магнитофона. В автомобильных моделях, где возможна резкая смена температур, может устанавливаться специальный подогреватель,

создающий постоянный микроклимат и обеспечивающий надежную работу БВГ. Кроме непосредственно головок БВГ содержит вращающийся трансформатор, с помощью которого сигналы с головок передаются на вход усилителя записи-воспроизведения. Принцип работы вращающегося трансформатора прост: друг над другом размещаются кольцевые катушки, одна из которых расположена на вращающейся части БВГ, другая – на неподвижной. Число каналов, образованных парами катушек, может быть различным и зависеть от количества головок, укрепленных на БВГ. Вращение одной из пар катушек трансформатора не оказывает влияния на характер электромагнитной связи между катушками, благодаря чему и осуществляется передача сигналов (рис.79). Для достижения лучших характеристик передачи используются специальные ферритовые чашки, а воздушный зазор между ними стремятся выполнить как можно более узким. Типичное значение зазора для вращающихся трансформаторов R-DAT-магнитофонов составляет 40 мкм.

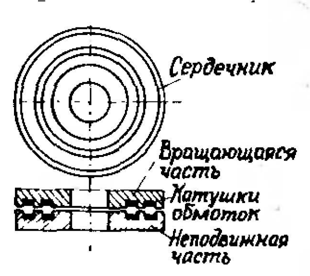


Рис.79.Конструкция вращающегося трансформатора

БВГ образует единую конструкцию с двигателем, обеспечивающим вращение верхнего барабана. В состав БВГ, кроме того, входит датчик положения, сигнал которого несет информацию о положении головок относительно ленты, и датчик скорости вращения, сигнал которого используется в системе сервоуправления двигателем БВГ.

Отдельно требует рассмотрения механизм загрузки кассеты, обеспечивающий открывание замков кассеты, приведение в рабочее положение и фиксацию в ЛПМ магнитофона. Существует три основных схемы загрузки кассеты: верхняя (с помощью поднимающегося контейнера-кассетоприемника), фронтальная (когда кассета при загрузке задвигается в щель на лицевой поверхности магнитофона) и линейно-скользящая (когда кассета опускается на выдвигающийся поддон, затягивающий кассету в ЛПМ). Механизм с верхней загрузкой, аналогичный способу загрузки кассеты в отечественном видеомагнитфоне "Электроника ВМ-12", используется, в основном, в переносных и носимых малогабаритных моделях. Он не требует применения дополнительных двигателей. Механизм фронтальной загрузки может быть использован в переносных, автомобильных и в стационарных магнитофонах. Этот механизм может быть выполнен как с применением двигателей, так и в чисто "ручном" варианте. В последнем случае

загрузка осуществляется с помощью специальной крышки, закрывающей щель кассетоприемника. Для стационарных дек часто используется механизм линейно-скользящей загрузки, обеспечивающий максимальные потребительские удобства, но требующий применения дополнительных двигателей. В то же время, использование полностью автоматизированной загрузки кассеты позволяет застраховаться от повреждения кассеты и магнитофона при ее неправильной установке. Если усилие загрузки превысит допустимое значение, то этот процесс прекращается, и кассета будет возвращена в исходное положение.

Массогабаритные показатели лучше у механизма с верхней загрузкой, затем идет механизм с фронтальной загрузкой и на последнем месте – механизм с линейно-скользящей загрузкой.

Ниже приведены характеристики ЛПМ R-DAT-магнитофонов DK4–ZS2002 и DK4–ZS2003 фирмы Mitsumi. Обе модели имеют единый ЛПМ и отличаются механизмом загрузки кассеты: у первого использован механизм верхней, у второго – фронтальной загрузки. Некоторые параметры магнитофонов:

– диаметр БВГ – 30 мм;
– угол охвата БВГ лентой – 90°;
– частота вращения БВГ в основном режиме – 2000 об/мин;
– ширина рабочих полюсов головок – 20,4±1,5 мкм;
– материал головок – сендаст+феррит;
– количество двигателей – 3 + 1 (для заправки ленты);
– скорость движения ленты в основном режиме – 8,15 мм/с;
в режиме широкой дорожки – 12,25 мм/с;
– скорость поиска – в 200 раз больше скорости воспроизведения;
– размеры модели DK4–ZS2002 – 99,4x104,5x29,0 мм,
DK4–ZS2003 – 110x105,5x39,5 мм;
– масса модели DK4–ZS2002 – 230 г,
DK4–ZS2003 – 280 г;
– напряжение питания – 5 В.

Общий вид ЛПМ показан на рис.80.

Кроме описанных режимов работы практически все ЛПМ имеют режим обзора вперед и назад, когда скорость движения ленты увеличивается относительно номинального (8,15 или 12,25 мм/с) значения в 2–3 раза при поиске нужного участка записи путем ускоренного проигрывания фонограммы.

Кроме ЛПМ с БВГ диаметром 30 мм и углом охвата 90° в классе носимых моделей получают распространение ЛПМ с диаметром 15 мм и углом охвата лентой барабана в 180°. Такой БВГ позволяет несколько уменьшить размеры ЛПМ, при этом обеспечивается стандартная сигналограмма записи на ленте и полная совместимость с любыми R-DAT-магнитофонами. Лентопротяжный механизм с БВГ диаметром 15 мм применен, например, в малогабаритном магнитофоне SV–MD1 фирмы Matsushita El. Увеличение угла охвата БВГ приводит к возрас-

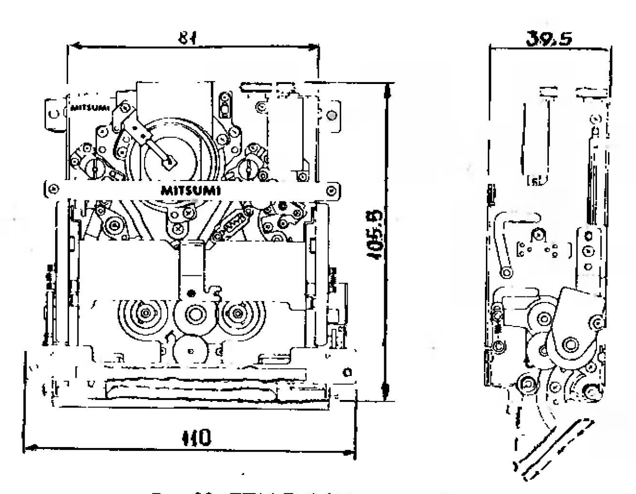


Рис.80. ЛПМ *R-DAT*-магнитофона фирмы Mitsumi (модель–ДК4ZS2003)

танию коэффициента трения при перемотках и, как следствие – к необходимости снижения скорости поиска. У названной модели скорость поиска выше номинальной в 60 раз.

Система сервоуправления R-DAT-магнитофона обеспечивает управление всеми видами приводов ЛПМ в различных режимах работы. Система включает в себя схему управления двигателями БВГ, ведущего вала, подкатушечных узлов. Сюда же можно отнести управление двигателем заправки ленты и двигателями механизма загрузки кассеты. В наиболее полном варианте сервосистема может управлять семью двигателями. При этом непосредственно к ЛПМ относятся пять: два двигателя подкатушечных узлов, двигатель БВГ, двигатель ведущего вала и двигатель заправки ленты. Еще два двигателя необходимы для механизированной заправки кассеты с помощью выдвигающегося поддона (механизм линейно-скользящей загрузки). В этом варианте механические передачи, муфты и т.п. имеют минимальные размеры. Управление осуществляется сигналами с многочисленных микропереключателей, размещенных в различных частях ЛПМ. Натяжение ленты измеряется с помощью специального датчика натяжения, сигнал с которого поступает в схему управления двигателями подкатушечных узлов. Минимальное число двигателей ЛПМ R-DAT-магнитофона, видимо, трудно сделать менее трех. Например, если загрузка кассеты осуществляется вручную, то потребность в двигателях для загрузки кассеты отпадает. Тем не менее, необходимо иметь отдельные двигатели для БВГ, ведущего вала и подкатушечных узлов.

Необходимость применения прямоприводных двигателей ведущего вала и БВГ вытекает из особенностей работы R-DAT-магнитофона (обеспечение автотрекинга и режима поиска). При усложнении механики

(введении дополнительных передач, фрикционных муфт и т.д.) возможно использование одного двигателя подкатушечных узлов вместо двух прямоприводных. В этом случае система натяжения ленты становится чисто механической. Электронный датчик натяжения ленты заменяется рычагом, связанным с ленточным тормозом узла подающей катушки. Уменьшение натяжения ленты вызывает сдвиг рычага, приводящий к дополнительному торможению подающей катушки, и наоборот. Подобные ЛПМ выпускаются рядом фирм наряду с ЛПМ, имеющими прямоприводные двигатели и электронную систему натяжения ленты. Последние обладают лучшей надежностью и плавностью транспортирования ленты, что позволяет реализовать на них более высокие скорости перемотки.

В качестве двигателя заправки ленты используется отдельный малогабаритный двигатель, который обычно является коллекторным и с его помощью при заправке ленты осуществляется развод стоек в рабочее положение. Кроме обводящих и наклонных стоек двигатель производит установку в рабочее положение рычага датчика натяжения ленты и прижимного ролика. Отвод прижимного ролика от ведущего вала в режимах "Стоп", "Пауза" "Поиск" и "Перемотка" также осуществляется двигателем заправки ленты. В принципе, возможно использование двигателя ведущего вала и для целей заправки ленты, но такое решение требует значительного усложнения механики и применения отдельного электромагнита для управления прижимным роликом. Поэтому, как правило, число двигателей в ЛПМ – не менее четырех. Один из них – для заправки ленты – работает непродолжительное время.

Структурная схема системы сервоуправления R-DAT-магнитофона, в ЛПМ которого использованы 4 прямоприводных двигателя, показана на рис.81. Особенность схем автоматического регулирования, управляющих двигателями ЛПМ, – широкое использование обратных связей по скорости с помощью датчиков частоты вращения. Все двигатели ЛПМ оснащены такими датчиками. Обратная связь позволяет значительно уменьшить неравномерность скорости вращения. В ЛПМ обычных аналоговых магнитофонов для достижения этой цели часто бывает достаточно поставить массивный маховик. Для ЛПМ R-DAT-магнитофона подобное решение не годится, так как маховик значительно увеличивает время реакции привода. Это недопустимо с точки зрения нормальной работы системы автотрекинга и быстрого поиска, когда важна быстрая обработка возмущающих воздействий. Обратная связь по скорости благоприятно сказывается на временных характеристиках привода в целом: электромеханическая постоянная двигателя при охвате его петлей обратной связи по скорости уменьшается пропорционально глубине обратной связи.

Схема сервоуправления двигателями подкатушечных узлов в режиме записи и воспроизведения поддерживает постоянное натяжение ленты. Сигнал с датчика натяжения ленты поступает на схему выделения

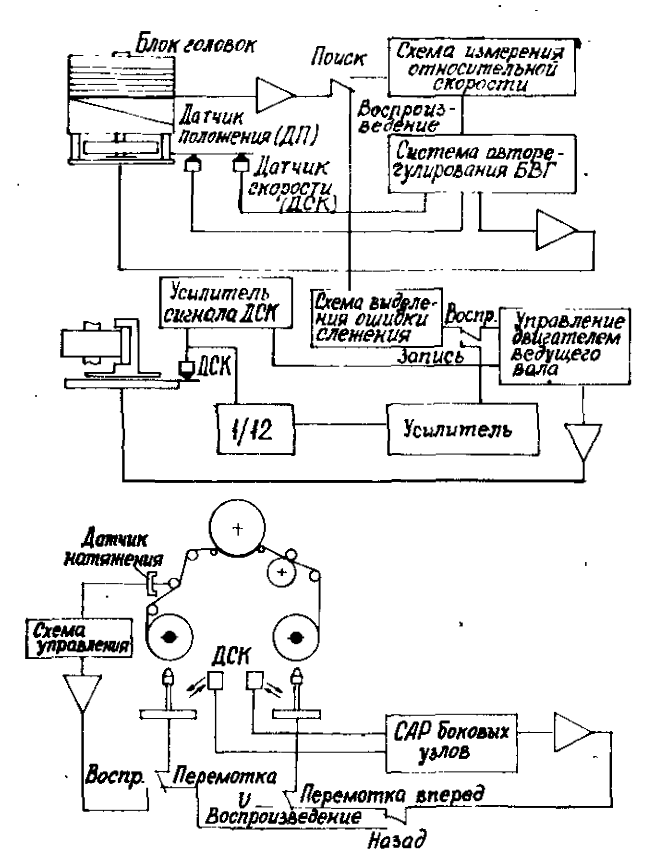


Рис.81. Структурная схема сервоуправления

ошибки, выходной сигнал которой управляет двигателем подающего узла. На двигатель принимающего узла в этих режимах подается постоянное напряжение. Усилие торможения, создаваемое двигателями подающего узла, на который поступает небольшое обратное напряжение, зависит от значения сигнала ошибки натяжения ленты. В режимах перемотки вперед и назад для поддержания постоянной линейной скорости ленты используются сигналы, поступающие с датчиков скорости подающего и принимающего узлов, которые представляют собой пластины с отражающими секторами, укрепленные на роторах двигателей. Считывание сигнала производится оптическим способом с помощью оптопары, один элемент которой излучает, а другой – принимает отраженный сигнал. В режиме перемотки (в зависимости от направления перемотки) на один из двигателей подкатушечных узлов подается более высокое, чем при воспроизведении, напряжение питания,

что обеспечивает увеличение скорости движения ленты. В режиме заправки ленты на двигатель подающего узла поступает небольшое обратное напряжение, чем обеспечивается натяжение ленты на направляющих стойках в процессе заправки, а в режиме выгрузки кассеты – сматывание петли ленты на подающую катушку.

В режиме воспроизведения скорость двигателя ведущего вала регулируется на основе значения ошибки слежения, вырабатываемого схемой выделения ошибки автотрекинга, принцип работы которой рассмотрен ранее. В режиме записи скорость вращения двигателя ведущего вала поддерживается постоянной. Скорость вращения блока головок в обоих режимах поддерживается постоянной, равной номинальному значению, с помощью системы авторегулирования.

Более сложные задачи встают перед системой сервоуправления в режиме поиска. При поиске фрагментов скорость транспортирования ленты в ЛПМ магнитофона увеличивается, как уже говорилось, примерно, в 200 раз. Возможна и более высокая скорость. Например, в модели D–900 фирмы Pioneer скорость поиска больше скорости воспроизведения в 300 раз. В режиме поиска необходимо производить считывание содержащих информацию о начале и номере нужного фрагмента данных из зон субкода. Хотя траектории головок в этих режимах не совпадают с дорожками записи, данные зон субкода, расположенные в начале и конце дорожек, считываются достаточно хорошо. Так как стартовый код с номером фрагмента записывается в зоне субкода многократно в течение продолжительного времени (8 с), пропуск нескольких дорожек вполне допустим.

Основная проблема, возникающая в режиме поиска – обеспечение постоянного значения относительной скорости между головкой и лентой, которое должно равняться относительной скорости при воспроизведении. Это требование диктуется необходимостью обеспечения работоспособности схемы ФАПЧ и корректора сигнала, которые имеют определенное значение центральной рабочей частоты и достаточно узкие пределы возможного изменения. Диапазон захвата систем ФАПЧ не превышает нескольких процентов. Расширение допустимого диапазона изменения центральной частоты схемы ФАПЧ и корректора трудно осуществимо и влечет за собой значительное усложнение электронных схем.

Если скорость вращения барабана с головками в режиме поиска не изменять, то относительная скорость будет отличаться от номинальной в недопустимых по стандарту пределах. Поэтому в режиме поиска схемой автоматического регулирования поддерживается такое значение скорости вращения барабана блока головок, при котором флуктуации относительной скорости не превосходят допустимых пределов для схемы ФАПЧ и корректора. Это хорошо поясняется с помощью векторных диаграмм. На рис.82 изображены траектории сканирования головок по ленте относительно дорожек записи при перемотке вперед и назад.

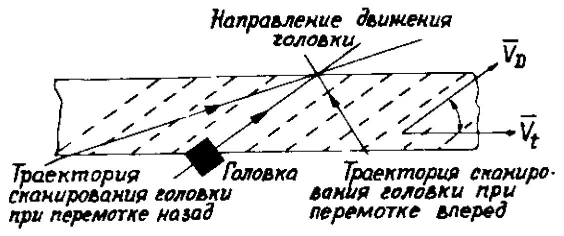


Рис.82. Траектория сканирования головок по ленте при перемотке

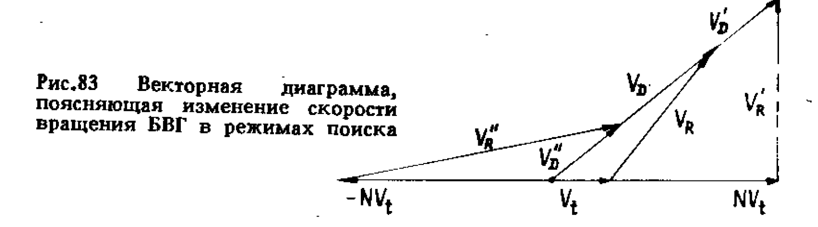


Рис.83 Векторная диаграмма, поясняющая изменение скорости вращения БВГ в режимах поиска

Для определения значений скорости вращения БВГ в режиме поиска рассмотрим векторную диаграмму (рис.83). Первоначальное расположение векторов скорости движения ленты и скорости головки показано на рис.82. Модуль вектора V_R' (длина) определяет значение относительной скорости. При перемотке вперед, когда вектор скорости движения ленты увеличивается в N раз ($N \cdot V_t$), для сохранения модуля вектора относительной скорости V_R' приходится увеличивать вращения БВГ (V_D').

При перемотке назад, когда вектор V_t меняет свое направление ($-N \cdot V_t$), скорость вращения БВГ необходимо уменьшать, чтобы значение относительной скорости осталось прежним. Расчет показывает, что при перемотке ленты вперед со скоростью, в 200 раз превышающей скорость воспроизведения, частота вращения БВГ должна составлять около 3000 об/мин, а при перемотке назад – около 1000 об/мин, что накладывает дополнительные требования на электродвигатель БВГ, а также на датчик частоты вращения двигателя, сигнал которого используется в системе авторегулирования.

Управление двигателями подкатушечных узлов и БВГ в режиме поиска осуществляется таким образом, чтобы изменения относительной скорости не превышали нескольких процентов (допустимое изменение для системы ФАПЧ и корректора обычно не превышает ±6 %), что обеспечивает возможность считывания данных с ленты в переходных режимах. Для достижения этой цели скорость вращения барабана изменяется согласно изменению скорости ленты. На каждом из этапов увеличения скорости перемотки частота вращения БВГ изменяется до тех пор, пока значение относительной скорости, фиксируемой специальной

электронной схемой, не станет равным номинальному. После этого происходит переход к следующему этапу увеличения скорости перемотки. Таким образом обеспечивается плановое увеличение скорости перемотки до максимального значения. При этом исключаются пропуски искомых фрагментов, так как процесс считывания информации с ленты не прерывается.

Первоначальное увеличение скорости движения ленты осуществляется с помощью двигателя ведущего вала, частота вращения которого

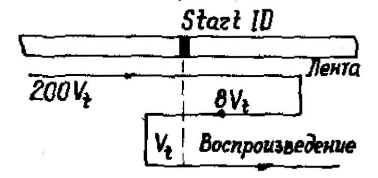


Рис.84. Процесс поиска заданного фрагмента записи

увеличивается при этом в 8–10 раз. Дальнейшее увеличение скорости движения ленты осуществляется с помощью двигателей подкатушечных узлов, при этом прижимной ролик отводится от ведущего вала.

Процесс поиска нужного участка записи показан на рис.84. Как только информация о начале нужного участка записи считывается с ленты, включается режим торможения, плавно замедляющий движение ленты и дающий возможность избежать растяжения ее основы. При этом начало фрагмента остается позади БВГ. После остановки с помощью двигателя ведущего вала лента начинает перематываться назад со скоростью, в 8–10 раз большей скорости воспроизведения. После повторного обнаружения начала фрагмента движение ленты прекращается, при этом начало фрагмента оказывается несколько впереди блока головок, затем включается режим воспроизведения, но магнитофон находится в режиме "молчания" до момента считывания с ленты информации о начале фрагмента. Подобным образом происходит поиск фрагмента и в режиме обратной перемотки.

Измерение относительной скорости головка-лента, на основании которого осуществляется управление двигателями БВГ и подкатушечных узлов в режиме поиска, производится путем фиксации временных интервалов между синхрогруппами соседних блоков одной дорожки. Этот временной интервал определяется выражением:

$$T_c = 360/f_p,$$

где f_p – скорость передачи канальных бит воспроизводимого сигнала.

Значение относительной скорости V_R может быть найдено из следующей формулы:

$$f_p = 2\,V_R/\lambda,$$

где λ – минимальная длина волны записи.

С помощью детектора блоковых синхрогрупп в процессе поиска выделяются импульсы, соответствующие началу блоков, пересекаемых головкой дорожек записи. Схема управления производит сравнение интервала между синхроимпульсами, поступающими с выхода детектора, со значением образцового интервала, соответствующего номинальному значению относительной скорости. В результате сравнения формируется управляющий сигнал, регулирующий частоту вращения двигателя БВГ. Если измеренный интервал больше образцового, скорость вращения увеличивается, если меньше – уменьшается. Для исключения возможных ошибок при измерении (необходимо производить измерение между двумя соседними блоками) контролируется адрес каждого блока и адрес кадра, информация о которых заключена в двух байтах идентифицирующего кода, следующих сразу за синхрогруппой блока. Кроме того, для исключения "ненадежных" сигналов, имеющих малый уровень, производится стробирование сигнала, поступающего на вход измерителя синхроинтервала. Подобным образом исключаются и сигналы ATF, которые могут внести ошибки в измерения.

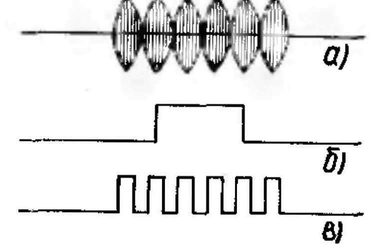


Рис.85. Стробирование сигнала, считываемого с ленты в режиме поиска: *а*) выходной сигнал магнитной головки; *б*) стробирующий сигнал, выделяющий ИКМ-зоны дорожек; *в*) стробирующий сигнал, выделяющий сигналы высокого уровня

Магнитные головки в режиме поиска при вращении БВГ пересекают ряд смежных дорожек. Так как головки реагируют на дорожки со своим значением азимутального угла зазора, на выходе головок сигнал имеет вид "бусин" (рис.85,*а*). С помощью порогового устройства и детектора формируются стробирующие сигналы, выделяющие выходные сигналы достаточного уровня для правильного измерения синхроинтервалов (рис.85,*в*). Схема синхронизации сигнала датчика положения головок вырабатывает еще один импульс, не пропускающий на вход измерителя синхроинтервалов сигналы ATF (рис.85,*б*).

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ ЦИФРОВОГО МАГНИТОФОНА

Широкое внедрение цифровой бытовой радиоэлектронной аппаратуры (компакт-дисковые проигрыватели, тюнеры цифрового радиовещания, цифровые предварительные усилители, цифровые звуковые и видеомагнитофоны) невозможно без БИС и СБИС обработки сигналов, полупроводниковых запоминающих устройств большой емкости, дешевых АЦП и ЦАП. Производство цифровой бытовой РЭА с исполь-

зованием только стандартных типов микросхем практически нереально, так как количество корпусов микросхем из-за повышенной сложности аппаратуры превысит всякие допустимые пределы. При этом возрастет потребляемая мощность, резко снизится надежность и повысится стоимость.

О необходимой степени интеграции R-DAT-магнитофонов можно судить по следующему примеру: в пересчете на активные элементы модель DTC–1000ES фирмы Sony должна содержать не менее 600000 транзисторов. Повышение степени интеграции ведет к снижению стоимости изделий, повышению надежности, снижению трудоемкости настройки изделий. Благодаря развитию средств проектирования БИС и СБИС на основе вычислительной техники становится рентабильным их многономенклатурное производство. На одном кристалле, например, могут быть интегрированы функции АЦП, ЦАП, памяти, вспомогательной логики и микропроцессора.

Основная тенденция в развитии полупроводниковой технологии заключается в непрерывном стремлении к уменьшению размеров элементов микросхем и увеличению плотности их упаковки.

В настоящее время для бытовой РЭА достаточно широко используется технология построения схем на структурах кремний–металл–окисел–полупроводник (КМОП) с проектными нормами 1,2 мкм и менее. Сокращение размеров кристаллов при неизменном проценте выхода снижает стоимость БИС и СБИС. Наиболее перспективным материалом для создания микросхем продолжает оставаться кремний. По прогнозам к 1995 году за счет уменьшения размеров элементов до 0,3–0,5 мкм степень интеграции СБИС возрастает до 10^6 элементов на кристалл. Дальнейшее увеличение степени интеграции до 10^9–10^{11} планируется при переходе от КМОП-элементов на элементы с квантовыми связями, позволяющими получить разрешающую способность 0,1–0,2 мкм.

В перспективе любой тип цифровой бытовой РЭА будет содержать одну-две СБИС, выполняющие все функции аппарата, что при больших тиражах выпуска СБИС до возможного предела снизит стоимость элементной базы.

Первые модели компакт-дисковых проигрывателей, выпущенных в 1982–1983 годах, содержали до 50 корпусов микросхем и стоили более 1000 долларов. В 1988 году уже выпускались модели, где все функции выполняются двумя СБИС. При этом стоимость компакт-дисковых проигрывателей снизилась в 3–4 раза. Ряд фирм разработали для R-DAT-магнитофонов специализированные комплекты БИС. В настоящее время эти комплекты производят фирмы Sony, Sanyo, Sharp, Matsushita El и другие. Например, комплект фирмы Sony включает в себя 5 основных микросхем, краткие характеристики которых приведены в табл.13. Интегральная схема CXA1045Q выполняет функции усилителя записи-воспроизведения. Она включает в себя таже корректор сигнала,

формирователь прямоугольного сигнала, коммутаторы режима записи-воспроизведения и каналов головок.

Таблица 13

Параметры	CXA1045Q	CXA1046M	CXD1008	CXD1009	CXD1052Q
Функция	Усилитель записи-воспроизведения, корректор	Выделение ошибки автотрекинга	Кодер-декодер двойного кода Рида-Соломона	Управление ОЗУ, адресация, выделение субкода, ФАПЧ	Управление сервоприводом БВГ
Тип элементов	Биполярный		КМОП	КМОП	КМОП
Напряжение питания, В	5	5	5	5	5
Потребляемая мощность, мВт	90	80	70	100	30
Тип корпуса	OFP (48 выводов)	SOP (28 выводов)	OFP (64 вывода)	OFP (80 выводов)	OFP (48 выводов)

OFP – корпус под поверхностный монтаж с четырехрядным расположением выводов;

SOP – корпус под поверхностный монтаж с двухрядным расположением выводов.

Для того, чтобы при разбросе параметров магнитных головок и каналов вращающегося трансформатора можно было оптимально подобрать параметры канала магнитной записи, для каждой из головок предусмотрен отдельный канал записи-воспроизведения и корректирующие цепи. Переключение каналов осуществляется коммутатором по сигналу датчика положения БВГ. Схема CXA1045Q позволяет также производить перезапись данных в зонах субкода, не трогая данных в ИКМ-зоне. При этом БИС переходит в режим записи только в местах расположения зон субкода, при сканировании остальной части дорожки микросхема работает в режиме воспроизведения.

Однокристальная БИС CXA1046M включает в себя цепи, необходимые для выделения ошибки слежения и синхронизации. С помощью встроенного фильтра выделяется пилот-сигнал, уровень которого поддерживается схемой АРУ постоянным. Высокочастотный сигнал детектируется детектором огибающей. Детектор синхросигналов при обнаружении синхросигналов автотрекинга вырабатывает управляющие импульсы. БИС CXA1046M работает совместно с БИС CXA1045Q и микросхемами обработки сигналов.

Схема CXD1052Q предназначена для управления сервоприводом двигателя вращающегося барабана. Управление осуществляется с помощью сигнала с широтно-импульсной модуляцией, которым регулируется скорость и фаза вращения двигателя. Наряду с режимами записи и воспроизведения, когда частота вращения барабана поддер-

живается постоянной, микросхема обеспечивает режим поиска, в котором поддерживается постоянной относительная скорость головка-лента.

БИС CXD1008Q при работе совместно с БИС CXD1009Q осуществляет функции системы коррекции ошибок с использованием двойного кода Рида-Соломона. При записи БИС осуществляет кодирование данных, а при воспроизведении – декодирование. Кроме этого микросхема выполняет интерполяцию неисправимых значений ИКМ-данных, сопряжение с ЦАП и АЦП, ослабление сигнала на 12 дБ в режимах подмотки ленты. В соответствии с используемым значением частоты дискретизации формируются различные виды синхросигналов. Возможен внешний контроль состояния коррекции ошибок.

Схема CXD1009Q формирует адреса ОЗУ при записи-чтении данных. При записи производится операция перемежения отсчетов ИКМ-сигнала, при воспроизведении – деперемежение. Схема включает в себя также цифровую часть петли ФАПЧ, осуществляющей выделение тактовой частоты при воспроизведении. При записи БИС CXD1009Q производит модуляцию данных с помощью канального кода 8–10, при воспроизведении – демодуляцию. При записи, кроме того, генерируются сигналы ATF и адреса кадров и блоков. Схема осуществляет выделение данных субкода и передает их в управляющую микроЭВМ. В режиме записи данные субкода, поступающие в микроЭВМ, кодируются и поступают на усилитель записи также через БИС CXD1009Q. Эта БИС формирует системные синхросигналы и включает в себя интерфейс для БИС CXD1008Q.

В качестве АЦП и ЦАП могут быть использованы любые БИС, имеющие подходящие параметры: АЦП CX20018 фирмы Sony, ЦАП CX20152 этой же фирмы и др. В качестве входных и выходных аналоговых ФНЧ применяются гибридные микросхемы, позволяющие реализовать ФНЧ высокого порядка при малых габаритах. Если используется передискретизация при цифро-аналоговом преобразовании и субдискретизация при аналого-цифровом преобразовании, требования к ФНЧ ослабляются. В этом случае ФНЧ может быть выполнен на обычных дискретных элементах и операционных усилителях.

На рис.86 изображена упрощенная структурная схема R-DAT-магнитофона DTC–1000ES фирмы Sony, в котором использован описанный комплект интегральных схем. Кроме того магнитофон содержит еще около 40 микросхем широкого применения. Эти микросхемы, в основном, входят в состав схемы управления лентопротяжным механизмом. В последующих поколениях магнитофонов они будут, без сомнения, заменены одной–двумя специализированными БИС. Магнитофон DTC–1000ES содержит несколько однокристальных микроЭВМ. Одна из них (управляющая) выполняет функции общего управления аппаратом, обработки информации субкода, команд с клавиатуры и с пульта дистанционного управления. Управляющая микроЭВМ выводит

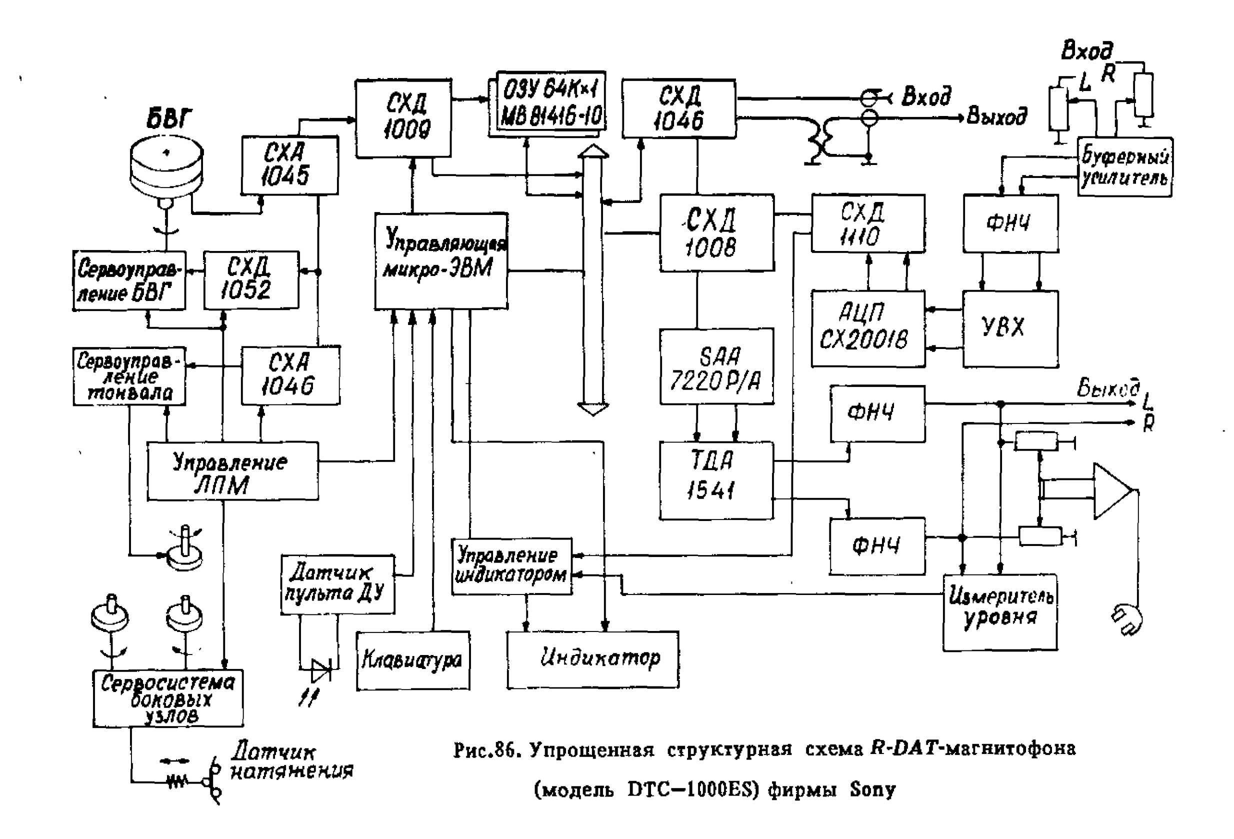


Рис.86. Упрощенная структурная схема *R-DAT*-магнитофона (модель DTC–1000ES) фирмы Sony

на индикатор информацию о режимах работы магнитофона, управляет магнитофоном в сервисных режимах. Второй микропроцессор служит в основном для управления линейной шкалой пикового индикатора уровней сигналов в каналах, используя сигналы, поступающие с микросхемы CXD1110.

В модели применяется флуоресцентный вакуумный индикатор, отображающий пиковые уровни сигналов в диапазоне от 0 до 50 дБ с разрешением на верхнем участке в 1 дБ. Максимальные уровни сигналов запоминаются на небольшое время для возможности точной установки уровня записи. На индикаторе (по выбору) отображается абсолютное время с момента записи-воспроизведения, время, оставшееся до конца ленты, или время воспроизведения каждого фрагмента. Индицируется текущий номер фрагмента, а в режиме поиска – номер фрагмента программы, который необходимо найти, и текущий номер. При повышенной влажности, когда возможно осаждение влаги на поверхности БВГ, загорается предупреждающая надпись. При этом магнитофон переходит в режим "Стоп". Постоянно индицируется значение рабочей частоты дискретизации.

Еще один микропроцессор управляет работой сервосистем ЛПМ. Все микропроцессоры – четырехразрядные.

В качестве ОЗУ используются две микросхемы MB81416–10. В дополнение к комплекту применена БИС CXD1146, обеспечивающая преобразование потока данных для цифрового входа-выхода. При наличии в записываемых с цифрового входа данных флага запрета копирования БИС CXD1146 останавливает запись. На индикаторе при этом загорается надпись "Перезапись запрещена".

В модели магнитофона DTC–1000ES реализована четырехкратная передискретизация перед ЦАП, обеспечиваемая цифровым фильтром SAA7220P. Сигнал с выходов фильтров поступает на сдвоенный 16-разрядный ЦАП TDA1541. На выходе ЦАП стоят простые аналоговые ФНЧ третьего порядка со схемой компенсации предыскажений. При наличии предыскажений в записанном на ленте сигнале эта цепь автоматически включается. С выхода ФНЧ аналоговый сигнал поступает на телефонный усилитель.

Входная часть магнитофонов состоит из двух ФНЧ высокого порядка, представляющих собой гибридные микросхемы фирмы Soshin. Схема выборки-хранения каждого канала реализована на двух малошумящих быстродействующих усилителях типа LF353. В качестве ключевого элемента использован высокочастотный кремниевый полевой транзистор 2SK152. Время выборки УВХ составляет около 10 мкс. Время преобразования АЦП (при частоте дискретизации 48 кГц) составляет 10,6 мкс. Аналого-цифровой преобразователь CX20018 построен по принципу токового интегрирования с двумя источниками тока, значения которых относятся друг к другу как $2^8 : 1$. Вывод цифровых данных осуществляется в последовательном виде, что уменьшает количество

соединений между платами. На вход цифрового фильтра и ЦАП данные поступают также в последовательном виде. Для достижения высоких качественных показателей, близких к предельно возможным, в высококачественных цифровых деках стремятся снизить наводки от цифровых сигналов на аналоговом выходе. Для этого аналоговую часть, включающую в себя входные и выходные цепи, АЦП и ЦАП, тщательно экранируют. Особое внимание уделяется правильному заземлению всех плат магнитофона. В некоторых моделях вместо коаксиальных кабелей используются волоконно-оптические линии связи, что позволяет максимально развязать цифровую и аналоговую части. Кроме того для питания различных функциональных узлов магнитофона применяют отдельные источники, а также отдельные трансформаторы (для исключения паразитной емкостной связи между обмотками аналогового и цифрового источников питания). Для улучшения экранировки металлическое шасси магнитофона часто покрывают тонким слоем меди.

При таких малых уровнях искажений и шумов, какие обеспечивает цифровая аппаратура, могут стать заметными даже искажения, вносимые соединительным кабелем. Дело в том, что обычный медный провод из-за наличия выраженной кристаллической структуры обладает слабым полупроводниковым эффектом. Роль полупроводникового перехода может играть и контакт разнородных материалов в местах подсоединения кабеля. В настоящее время за рубежом для высококачественной аппаратуры выпускают соединительные кабели, выполненные из бескислородной отожженной меди, которая не дает полупроводникового эффекта. Разъемы таких кабелей покрываются золотом или палладием.

ФОРМАТ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСИ НА ЛЕНТУ И КОНТАКТНОЕ КОПИРОВАНИЕ

Стандарт R-DAT предусматривает в качестве обязательного режим воспроизведения предварительно записанных на студиях звукозаписи кассет. Частота дискретизации при этом составляет 44,1 кГц. Цифровая перезапись студийных кассет и компакт-дисков невозможна. Такое ограничение введено по требованиям звукозаписывающих компаний для защиты авторских прав создателей звуковых программ, поскольку цифровая перезапись не вносит искажений и позволяет получить практически полный аналог студийной мастер-ленты, которая может незаконным образом тиражироваться в домашних условиях. Практически все выпускаемые R-DAT-магнитофоны оснащены системой запрета цифрового копирования при частоте дискретизации 44,1 кГц. Возможность перезаписи с компакт-диска или предварительно записанной кассеты через аналоговый выход магнитофона при этом остается. Обычный слушатель не улавливает ухудшение звучания, возникающее за счет аналого-цифрового преобразования (сужение динамического диапазона около 3—4 дБ). Некоторые записывающие фирмы (в основном

американские) требуют внедрения системы запрета не только цифровой, но и аналоговой перезаписи с компакт-диска на R-DAT-магнитофон. Предложение об обязательной установке микросхем, обеспечивающих запрет копирования с компакт-диска, во все R-DAT-магнитофоны, продаваемые в США,рассматривалось в Национальном Бюро стандартов США. Заключение этого бюро о предложенной системе запрета копирования было отрицательным, т.к. она еще недостаточно надежна.

Сущность системы состоит в том, что на компакт-дисках, имеющих запрет на перезапись, вырезается узкий участок звукового спектра записи между 3700 и 3900 Гц. Отсутствие сигналов в данной полосе частот распознает схема запрета копирования магнитофона, и перезапись блокируется. Фирма Philips предложила свою систему защиты авторских прав изготовителей компакт-дисков, разрешив цифровое копирование с частотой дискретизации 44,1 кГц, но только для одной копии. При записи с этой частотой дискретизации вместе с записываемой программой в зоне записи кода ID устанавливается флаг запрета цифровой копии. При этом последующая цифровая перезапись этой кассеты становится невозможной, что ограничивает широкое домашнее тиражирование записей с компакт-дисков и кассет.

Стандартом предусмотрены два режима воспроизведения предварительно записанных кассет – нормальный (скорость движения ленты 8,15 мм/с) и режим широкой дорожки (скорость движения 12,25 мм/с, ширина дорожки 20,41 мкм). В первом случае запись кассет производится с помощью таких же DAT-магнитофонов в реальном масштабе времени, что не подходит для широкого тиражирования кассет с записями.

Режим с широким шагом дорожки используется для массового производства кассет с записями путем скоростного контактного копирования. Запись программ на ленту при этом происходит со скоростью, в 180 раз большей скорости воспроизведения магнитофона. Принцип контактного копирования заключается в том, что сигнал ленты с сигналограммой-оригиналом копируется на ленту путем прямого контакта обеих лент (рис.87). При этом лента-копия должна обладать более низкой коэрцитивной силой, чем лента-оригинал. В качестве ленты-оригинала используется металлопорошковая, а в качестве лент-копий – барий-ферритовые или хромоксидные ленты. Хотя можно использовать и любую другую, если ее характеристика воспроизведения совместима с характеристиками обычной ленты. Существует два метода контактного копирования – магнитное и термомагнитное.

Термомагнитное копирование осуществляется путем подогрева ленты-копии до температуры выше точки Кюри и последующего ее охлаждения после контакта с лентой-оригиналом. Хромоксидная лента характеризуется низкой температурой точки Кюри (130 °С). Магнитное копирование производится во внешнем магнитном поле подмагничивания. Подобный метод используется для тиражирования видеозаписей для бытовых видеомагнитофонов, использующих ленту шириной

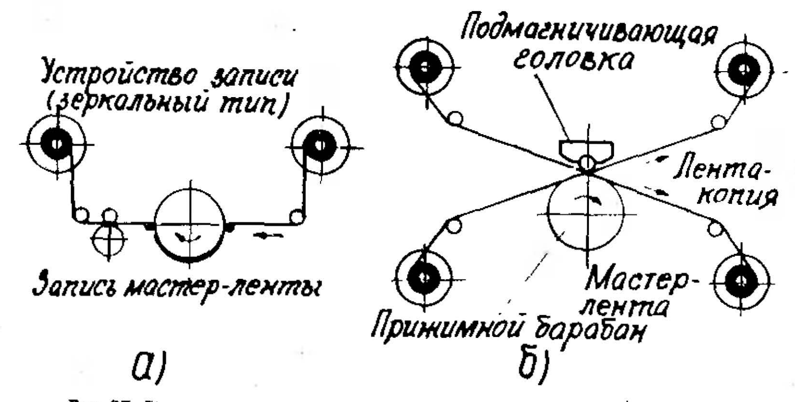


Рис.87. Процесс контактного копирования: *а*) запись мастер-ленты; *б*) тиражирование копий

12,7 мм. Копирование осуществляется через тесный контакт ленты с записью с лентой для копирования. С помощью вращающегося барабана обе ленты пропускаются около роликовой головки подмагничивания. Магнитное поле подмагничивания выбирается таким, чтобы не стереть ленту-оригинал и обеспечить запись сигналов на ленте-копии. Такой выбор возможен благодаря различной коэрцитивной силе ленты-оригинала и ленты-копии (для стирания записи ленты-оригинала требуется более сильное поле, чем для ленты-копии). Так как лента-оригинал должна являться зеркальным отображением ленты-копии, запись ее производится на специальном магнитофоне, в котором лента движется в обратном направлении, а направляющие ленты имеют противоположный наклон для реализации структуры дорожки в зеркальном отображении. Выходной уровень сигнала, записанного на ленте-копии с помощью контактного копирования, ниже уровня сигнала металлопорошковой ленты. Поэтому, чтобы скомпенсировать снижение уровня сигнал-шум необходимо увеличить ширину дорожки воспроизведения. В режиме широкой дорожки при правильном следовании по траектории дорожки записи головка не захватывает соседних дорожек. Благодаря этому уровень перекрестных помех понижается, и становится возможным некоторое снижение уровня сигнала без увеличения коэффициента ошибок. Сигналы пилот-тона системы автотрекинга со смежных дорожек могут считываться благодаря наличию "бокового" эффекта головки, позволяющего схватывать низкочастотные сигналы из областей, прилегающих к полосам головки. Для режима широкой дорожки расположение сигналов ATF несколько изменяется, чем обеспечивается совместимость схем управления системы автотрекинга при работе на скорости 8,15 мм/с и 12,25 мм/с (длительность сигналов пилот-тона увеличивается в 1,5 раза). Для получения необходимого уровня сигналов автотрекинга, копирование которых осуществляется намного хуже, чем

высокочастотных сигналов ИКМ-зоны, при записи ленты-оригинала применяются предыскажения этих сигналов.

Система контактного магнитного копирования имеет следующие характеристики:

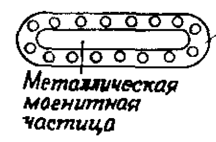
- ширина ленты – 3,81 мм;
- подмагничивающая головка – головка роликового типа;
- максимальное поле подмагничивания – около 1150 Э;
- частота поля подмагничивания – 25 кГц;
- контактное давление – 8 кг/см^2;
- скорость копирования – 2,2 м/с.

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНОЙ ЛЕНТЫ И ГОЛОВОК

Развитие высокоплотной магнитной записи основывается на непрерывном совершенствовании свойств магнитных материалов и параметров магнитных головок. Для обеспечения высокоплотной записи необходимо прежде всего увеличить контакт между лентой и головкой. Неплотное прилегание головки к ленте обязано наличию шероховатостей на их поверхностях. Общие потери из-за неконтакта в процессе записи-воспроизведения составляют 99 d/λ дБ, где d – величина неконтакта, а λ – минимальная длина волны записи. Если неконтакт составляет 1/10 часть длины волны записи ($d = \lambda/10$), то потери равны 9,9 дБ, т.е. сигнал уменьшается почти в 3 раза. При минимальной длине волны записи для R-DAT-магнитофонов, равной 0,67 мкм, имеем $\lambda/10 \approx$ $\approx$ 0,07 мкм, что соответствует толщине 70 атомных слоев! Отсюда и следуют особые требования к чистоте обработки поверхностей головок и ленты.

Для достижения высокоплотной записи с вероятностью появления ошибочных символов не более 10^{-3} необходимо использовать высококоэрцитивную ленту. В R-DAT-магнитофонах применяется металлопорошковая лента, близкая по характеристикам к используемой в видеомагнитофонах Video–8. Особые требования предъявляются и к размерам и однородности частиц порошка, наносимого на ленту. Для формирования магнитного слоя ленты использование частиц металлов и их сплавов вместо окислов диктуется необходимостью расширения интервала индукции насыщения и коэрцитивной силы. Недостатком использования металлов вместо окислов является то, что металлические частицы обычно химически активны, имеют тенденцию к коррозии в атмосфере и реагируют со связующим веществом. При производстве лент для защиты от окисления применяется специальная технология, обеспечивающая покрытие каждой металлической частички защитным слоем, который имеет чрезвычайно малую толщину и может состоять, например, из мономолекулярного слоя двуокиси кремния (рис.88). Такая технология обеспечивает высокую устойчивость магнитного слоя ленты к внешним воздействиям и стабильность ее характеристик в течение длительного времени.

Рис.88. Структура частиц магнитного слоя ленты



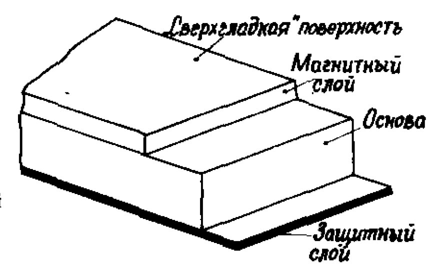


Рис.89. **Структура магнитной ленты для** ***R-DAT***

В отличие от лент, предназначенных для записи аналоговых сигналов, к лентам для цифровой записи предъявляются особые требования по обеспечению минимального количества выпадений на единицу поверхности. Это накладывает дополнительные требования на технологию нанесения порошка на основу, которая должна обеспечить высокую однородность заполнения магнитными частицами рабочего слоя ленты по всем направлениям.

Магнитная лента дл R-DAT-магнитофонов имеет три слоя. Толщина магнитного слоя равна 3 мкм, толщина основы – 9 мкм (при толщине ленты 13 мкм) и толщина защитного слоя, нанесенного на рабочую поверхность ленты – 1 мкм (рис.89). Планируется также производство ленты толщиной 10 мкм, у которой толщина основы будет 6 мкм. Применение ленты толщиной 10 микрон позволит увеличить время воспроизведения в основном режиме до 3 часов (в режиме долгоиграния – до 6 часов). Для защиты основы ленты, уменьшения коэффициента трения, что особенно важно при высоких скоростях перемотки ленты в сервисных режимах, служит защитный слой, обладающий малым коэффициентом трения. Кроме того, защитный слой предотвращает накопление электрических зарядов на ленте, так как обладает низким поверхностным сопротивлением.

В начале 1987 года, одновременно с началом промышленного выпуска R-DAT-магнитофонов, практически все крупнейшие фирмы – производители магнитной ленты заявили о готовности выпуска DAT-кассет с лентой. DAT-кассеты производятся с длиной ленты, рассчитанной на 46-, 90- и 120-минутное воспроизведение.

Новейшая технология обеспечивает высокую эксплуатационную надежность лент. Испытания ленты фирмы Sony показали, что коэффициент ошибок практически не увеличился после 300 прогонов через магнитофон.

Основные типовые характеристики магнитных лент следующие:
- коэрцитивная сила, H_c – 1400–1500 Э;
- остаточная магнитная индукция, $B_{ост}$ – 2400–2500 Гс;
- коэффициент прямоугольности петли гистерезиса – 0,83–0,86;
- усилие на разрыв – 1,5 кГ.

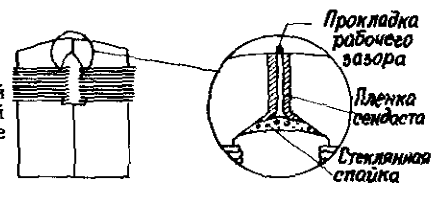
Наряду с металлопорошковыми могут быть использованы металлические, или тонкопленочные ленты. Рабочий слой таких лент формируется осаждением паров металлов на основу в вакууме. Тонкопленочные носители позволяют получать более высокие уровни записываемых сигналов, поскольку имеют стопроцентное содержание магнитного материала в рабочем слое (в порошковых носителях 20–40 %) и более высокую намагниченность используемых сплавов. Поток магнитной индукции в тонкопленочном носителе концентрируется ближе к головкам, что повышает эффективность как записи, так и воспроизведения. Использование тонкопленочных лент для бытового применения ограничивается их высокой стоимостью.

Вместо металлопорошковых лент для записи по формату R-DAT возможно использование барий-ферритовых лент, имеющих более низкую коэрцитивную силу (около 900 Э). Они имеют достоточно хорошие характеристики записи, и их использование вполне возможно при оптимизации характеристик корректора и тока записи, разница в значениях которых незначительна.

Магнитные головки для R-DAT-магнитофонов обладают рядом особых свойств. Материал сердечника головки должен иметь высокую магнитную проницаемость и обладать достаточной износоустойчивостью. Края рабочих зазоров должны быть по возможности равными и параллельными. Для увеличения градиента поля записи на поверхности носителя необходимо иметь как можно меньшую глубину зазора головки, однако при этом следует избегать насыщения сердечника в области, прилегающий к рабочему зазору. Для ферритовых головок насыщение краев рабочего зазора является главным ограничением, не позволяющим использовать их для высокоплотной записи на металлопорошковые ленты. Оптимальная запись ферритовыми головками возможна до значения коэрцитивной силы ленты 625 Э, что в два с лишним раза меньше коэрцитивной силы лент, применяемых в формате R-DAT. Запись на ленту с такой коэрцитивной силой обеспечивают только головки с сердечниками из сендаста или аморфного металла. Но они имеют свои недостатки: износоустойчивость сендаста и аморфного металла в несколько раз ниже износоустойчивости монокристаллических ферритов; металлические сердечники имеют повышенные высокочастотные потери.

Для записи в формате R-DAT применяются составные сендаст-ферритовые (вместо сендаста может использоваться аморфный металл) магнитные головки нового типа, в которых на грани ферритовых полусердечников, образующих рабочий зазор, напыляется сендаст. Головка

Рис.90. Конструкция магнитной головки для высокоплотной записи на высококоэрцитивные ленты



этого типа получила название "головка с металлом в зазоре" (MIG-head). Конструкция головки показана на рис.90. Магнитная головка такого типа удачно сочетает в себе высокую износоустойчивость и способность эффективно производить запись на высококоэрцитивные носители.

Если запись производить не требуется и на головку возлагается только функция воспроизведения, сердечник головки может изготавливаться целиком из феррита, что существенно снижает ее стоимость. Такие головки устанавливаются в DAT-магнитофоны без функции записи: автомобильные и переносные модели.

Амплитудно-частотная характеристика универсальной магнитной головки для R-DAT-магнитофона фирмы Sony приведена на рис.91.

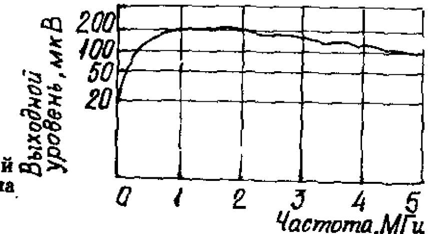


Рис.91. Характеристики магнитной головки для *R-DAT*-магнитофона фирмы Sony

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

В большинстве моделей R-DAT-магнитофонов применяются прямоприводные электродвигатели постоянного тока (БДПТ), которые называются также бесколлекторными, вентильными или электронными двигателями, поскольку коммутация катушек обмотки статора у них осуществляется электронными элементами по сигналам датчика положения ротора (ДПР). Эти двигатели при использовании в R-DAT-магнитофоне должны удовлетворять следующим требованиям: иметь малую неравномерность мгновенной скорости вращения; малый уровень акустических шумов; малые габариты, массу и потребляемую мощность; высокую надежность и малую стоимость.

Типичной конструкцией БДПТ, позволяющей уменьшить габариты двигателя и сделать его плоским, является конструкция с осевым рабочим зазором. Особенностями такого двигателя являются наличие

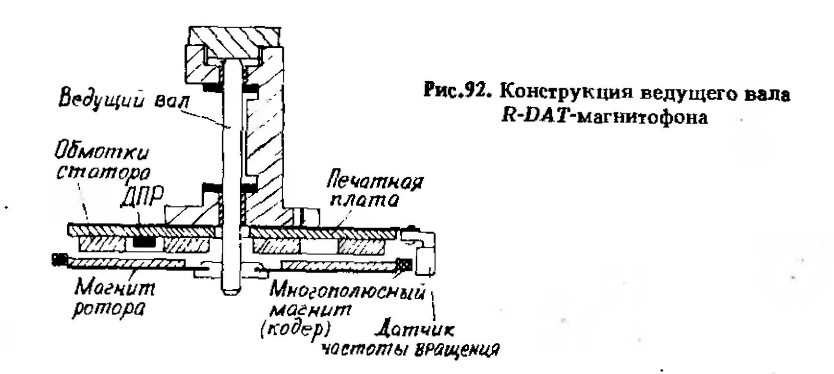


Рис.92. Конструкция ведущего вала *R-DAT*-магнитофона

магнитной системы торцевого типа с магнитным током, направленным вдоль оси вращения двигателя, и плоских катушек статора, расположенных между магнитом ротора и ярмом статора (рис.92).

Вращающий момент в двигателе создается в результате взаимодействия магнитного потока в промежутке между полюсами магнита ротора и основанием статора с проводниками обмотки, по которым протекает электрический ток. Управление коммутацией катушек обмоток статора в зависимости от положения полюсов магнита ротора осуществляется по сигналам датчика положения ротора.

На практике нашли применение двух- и трехфазные двигатели. В таких двигателях магнит ротора имеет, как правило, шесть-восемь полюсов. Сам магнит изготавливают из магнитотвердых материалов на основе порошка феррита различных металлов. Катушки каждой фазы имеют многослойную намотку одним или двумя проводами с числом витков 60–100. Витки катушки после намотки склеивают, получая монолитную бескаркасную обмотку.

Большое число катушек статора, как и полюсов магнита ротора способствует равномерности вращения. Однако широкое распространение получили БДПТ с небольшим числом катушек, так как увеличение их числа приводит к большим усложнениям конструкции самой катушки и статора в целом.

Валы двигателей из-за малого диаметра, в основном, гладкие, т.е. с одинаковым сечением во всей длине. Концевой опорной частью валов БДПТ плоской конструкции обычно является шаровая пята, изготовленная путем заточки конца вала по сфере или завальцовки стального шарика в гнездо на торце вала.

Датчик частоты вращения представляет собой устройство, преобразующее механическое вращение вала двигателя в сигнал, пропорциональный скорости вращения ротора. По принципу действия датчики можно разделить: на индукционные, основанные на индуцировании электрического сигнала в обмотке изменяющимся магнитным потоком (аналог – магнитная головка); гальваномагнитные, основанные на

использовании чувствительных элементов, реагирующих на изменение напряженности магнитного поля; оптические, основанные на принципе модуляции светового потока. Все три типа датчиков применяются в БДПТ.

Примером первого типа служит датчик с меандровой обмоткой. В датчиках этого типа модулирующим элементом является многополюсный магнит кольцевой формы, расположенный на роторе двигателя, а чувствительным элементом – обмотка в виде меандра, нанесенная печатным способом на подложку и расположенная под модулирующим элементом (рис.93). При вращении двигателя создается переменный магнитный поток, под действием которого в обмотке датчика возникает ЭДС с частотой, пропорциональной скорости вращения вала двигателя. Для достижения приемлемой амплитуды сигнала зазор между магнитной системой и меандровой обмоткой делают очень малым (десятые доли миллиметра), что требует применения прецизионных деталей и прецизионной сборки.

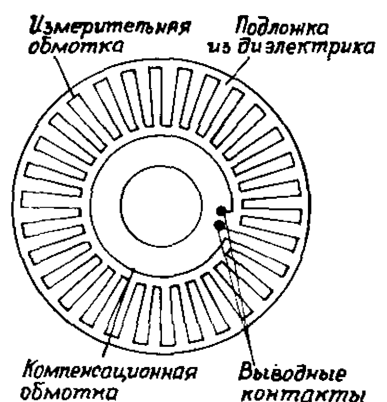


Рис.93. Датчик частоты вращения печатного типа

В гальваномагнитных датчиках в качестве магниточувствительного элемента используются преобразователи Холла и магниторезистивные преобразователи.

В основе работы оптических датчиков лежит принцип модуляции светового потока. Модулятором обычно служит штриховая маска, а чувствительным элементом – фототранзистор.

Датчик положения ротора (ДПР) служит для создания сигналов, несущих информацию о положении ротора относительно обмоток статора. По этим сигналам коммутатор вырабатывает сигналы управления, поступающие в обмотку статора. По принципу действия и конструктивному исполнению ДПР похожи на датчики частоты вращения. Наибольшее распространение в настоящее время получили ДПР на основе преобразователей Холла. ДПР располагаются в непосредственной близости от магнита ротора, часто прямо внутри катушек статора.

Основные функции электронного коммутатора: обработка сигналов, поступающих с ДПР и датчика частоты вращения; коммутация по сигналам ДПР токов в обмотках в заданные моменты времени и в заданной последовательности. Функциональная схема коммутатора определяется типом ДПР и способом питания обмоток двигателя.

В настоящее время ведущими зарубежными фирмами выпускается широкая номенклатура двигателей для R-DAT-магнитофонов. Характеристики некоторых из них приведены ниже.

Двигатель БВГ 504E фирмы Guide:

– рабочее напряжение – 7 В;
– номинальная частота вращения – 2000 об/мин;
– рабочий момент – 1,5 г·см;
– время выхода на номинальный режим – 0,12 с;
– ток потребления в номинальном режиме – 40 мА;
– пусковой ток – 600 мА;
– пусковой момент – 35 г·см;
– масса – 15 г;
– размеры – 32x24x8 мм;
– диаметр ротора – 23,75 мм;
– неравномерность частоты вращения (в сборе с БВГ) – не более 0,03 %.

Прямоприводной двигатель ведущего вала фирмы Mitsumi:

– напряжение питания – 4–7,2 В;
– управляющее напряжение – 0–7 В;
– номинальная частота вращения – 77,7 об/мин;
– рабочий момент – 7 г·см;
– ток потребления – 70 мА;
– пусковой момент – 35 г·см;
– частота датчика скорости – 520 Гц/об;
– нестабильность вращения – 0,3 %.

Прямоприводной двигатель боковых узлов фирмы Sony:

– напряжение питания – 4–5,3 В;
– управляющее напряжение – 0–6 В;
– номинальная частота вращения – 4270 об/мин;
– ток потребления – 60 мА;
– пусковой момент – 20,5 г·см;
– число полюсов датчика скорости – 24.

ЦИФРОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА В БЫТОВОЙ РЭА

МОДЕЛИ ЦИФРОВЫХ ЗВУКОВЫХ МАГНИТОФОНОВ

До появления в 1987 году цифровых звуковых магнитофонов формата R-DAT существовало две системы бытовой цифровой магнитной звукозаписи, которые использовались для записи цифровых сигналов видеомагнитофонами. Первая система появилась в 1977 г. с выпуском фирмой Sony ИКМ-процессоров в виде приставки к видеомагнитофонам форматов VHS, Beta (модель PCM–1). ИКМ-процессор осуществляет преобразование аналоговых звуковых сигналов в цифровые, которые затем преобразуются в псевдотелевизионный сигнал и записываются на любом видеомагнитофоне вместо видеопрограммы.

Вторая система цифровой звукозаписи предполагает использование видеомагнитофонов формата Video–8, звуковое сопровождение видеопрограмм в которых может записываться двумя способами: с помощью частотной модуляции и цифровым методом при помощи специальной головки, дополнительно устанавливаемой в БВГ. Оба этих способа оговорены в стандарте на Video–8. При использовании цифрового способа записи сигналы двух звуковых каналов преобразуются в цифровую форму и подвергаются временной компрессии перед записью на ленту. Запись осуществляется вне зоны основных дорожек с помощью головки, устанавливаемой в БВГ под углом 36° по отношению к двум видеоголовкам. Эта головка образует в конце основных дорожек дополнительные короткие дорожки записи, куда и записывается цифровой сигнал (рис.94). При воспроизведении происходит восстановление временного масштаба записанного на дополнительных дорожках ИКМ-сигнала. Для уменьшения интенсивности цифрового потока применяется 8-разрядное нелинейное квантование и частота дискретизации, равная 31,5 кГц. Видеомагнитофоны с шириной ленты 8 мм, имеющие цифровое звуковое сопровождение, также способны записывать звуковые программы.

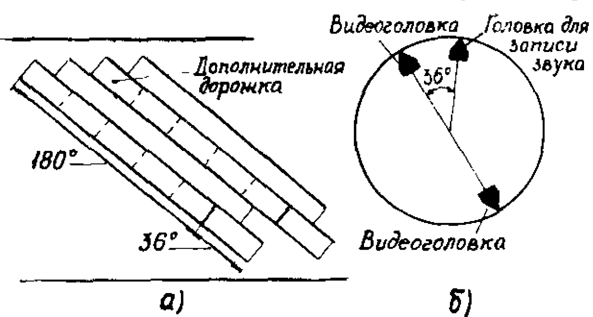


Рис.94. Формат цифровой записи звука в видеомагнитофоне с шириной ленты 8 мм: *а)* формат записи на ленту; *б)* установка дополнительной головки на БВГ

Только при этом вместо видеопрограмм основная дорожка записи делится *на пять секторов, в которых осуществляется запись* ИКМ-сигналов. Длина каждого сектора равна длине дополнительной дорожки. Таким образом время звучания при записи только звуковых программ может быть увеличено в 6 раз. Недостатком данных видеомагнитофонов как цифровых является сравнительно невысокое качество звучания. К недостаткам *же обеих систем можно отнести отсутствие* возможности записи данных субкода связанных с ним сервисных функций. Характеристики этих систем звукозаписи в сравнении с R-DAT-магнитофоном приведены в табл. 14.

Таблица 14

Параметры	*ИКМ-процессор+* видеомагнитофон	Видеомагнитофон с шириной ленты 8 мм	R-DAT-магнитофон (основной режим)
Частотная характеристика, Гц	5–20000	30–15000	5–22000
Число каналов	2	2	2
Частота дискретизации, кГц	44,056 (NTSC) 44,1 (PAL)	31,5	48
Количество разрядов квантования	16	8 (нелинейное)	16
Динамический диапазон, дБ	96	90	96
Коэффициент икажений, %	0,005	до 1	0,005
Ширина ленты, мм	12,65	8	3,81
Ширина дорожки записи, мкм	58 (VHS) 19 (VHS, режим LP*)	20,5	13,591
Размер кассеты, мм	188x104x25(VHS)	95x62,5x15	75x54x10,5
Скорость движения ленты, мм/с	33,45 10,1 (LP*)	14,345	8,14
Время записи-воспроизведения	8 часов (LP*)	4 часа (LP*) 2 часа x 6 4 часа x 6 (в звуковом режиме)	2 часа 4 часа (LP*)
Скорость передачи субкода	–	–	273 кбит/с

При сравнении систем преимущество R-DAT-магнитофонов очевидно. Выигрывая в продолжительности времени записи на одну кассету, системы звукозаписи с использованием видеомагнитофонов проигрывают

*) *LP – режим долгоиграния, который имеют некоторые магнитофоны (для VHS время воспроизведения увеличивается в 3 раза, для видеомагнитофонов с* шириной ленты 8 мм и R-DAT – в 2 раза).

или в габаритах (ИКМ-процессор), или в качестве звучания (видеомагнитофоны с шириной ленты 8 мм). Все это наряду с большими потребительскими удобствами системы R-DAT обеспечило ее успех на коммерческом рынке.

Для сравнения с характеристиками других систем цифровой магнитной записи в табл. 15 приведены основные параметры системы многодорожечной записи в формате S-DAT.

Таблица 15

Параметры	Основной режим	Дополнительный режим			Воспроизведение студийных кассет
		1	2	3	
Число каналов	2	2	2	2x2	2
Частота дискретизации, кГц	48	32	32	32	44,1
Число разрядов квантования	16	16	12 (нелинейное)		16
Скорость ленты, мм/с	47,6	31,7	23,8	47,6	43,7
Код коррекции ошибок	Двойной код Рида-Соломона C1: (29, 27,3) C1 : (40, 32,9)				
Канальный код	8 – 10				
Скорость передачи субкода, кбит/с	128	85,3	64	64,2	117,6
Размеры кассеты, мм	86x55,5x9,5				
Время записи, мин	90	135	180	90	98
Цифровой поток, Мбит/с	2,4	1,6	1,2	1,2x2	2,205

Магнитофоны формата S-DAT в 1987–1988 годах на рынок не поступали и, очевидно, что они не смогут составить серьезную конкуренцию R-DAT-магнитофонам.

В конце 1987 года только японскими фирмами было выпущено более 30 различных моделей R-DAT-магнитофонов. В основном это были стационарные деки, рассчитанные на самого взыскательного слушателя. Тем не менее, уже первое поколение R-DAT-магнитофонов имело и автомобильные, и носимые модели. Фирмой Sony были выпущены также две профессиональные модели: PCM–2000 (портативный носимый репортерский магнитофон) и PCM–2500 (стационарный студийный магнитофон с функцией записи с частотой дискретизации 44,1 кГц).

В конце 1988 года после двух лет производства R-DAT-магнитофонов выявились определенные тенденции развития этого класса бытовой аппаратуры. Прежде всего, это снижение стоимости модели. Стоимость моделей первого поколения на японском рынке составляла от 250000 до 170000 иен (1 доллар – 120–140 иен). Модели, выпущенные в 1988 году, стоили 140000–170000 иен. Например, модель DTC–1000ES фирмы Sony,

выпущенная в 1987 году, стоила 200000 иен, а следующая модель этой же фирмы DTC–M100 – уже 140000 иен. Несомненно, что с увеличением объема выпуска R-DAT-магнитофонов цены на них будут снижаться и далее.

Первые стационарные модели были ориентированы в основном на любителей высококачественного звучания и полупрофессиональное применение. Эти модели характеризуются использованием особых мер по достижению качественных показателей, близких к предельным. Прежде всего, это особые требования к конструкции стационарных дек: разделение аналоговых и цифровых блоков, использование омедненных экранов-шасси, разделение схем левого и правого каналов, использование отдельных источников питания, передача сигналов между блоками с помощью коаксиальных и оптоволоконных кабелей. Среди схемотехнических решений можно отметить использование цифровых фильтров передискретизации практически во всех моделях, в том числе в носимых и автомобильных. Как правило, используется 4-кратная передискретизация. Проявляется тенденция к использованию субдискретизации при аналого-цифровом преобразовании для дальнейшего повышения качества звучания при записи фонограммы с аналогового входа. Очевидно, что широкое распространение цифровых фильтров субдискретизации начнется при появлении дешевых 16-разрядных АЦП, способных работать на частотах субдискретизации в 96–192 кГц. О выпуске семейства АЦП с такими параметрами в 1988 году заявила известная фирма BURR BROWN.

Среди R-DAT-магнитофонов первого поколения выделяется модель D–1000 фирмы Pioneer,в которой был установлен цифровой фильтр с 2-кратной субдискретизацией после АЦП. Для улучшения качества звучания в большинстве моделей используются отдельные АЦП и ЦАП для левого и правого каналов. Уменьшение искажений сигналов низкого уровня достигается двумя путями: использованием генератора низкоуровневого шума (differ), добавляемого к сигналу при аналого-цифровом преобразовании, и увеличением разрядности АЦП и ЦАП. Первый метод приводит к небольшому сужению динамического диапазона (около 4,8 дБ), но характеризуется простотой реализации и хорошими результатами. Такой метод используется при аналого-цифровом преобразовании в R-DAT-магнитофоне DTC–1000ES фирмы Sony. Второй метод применен в модели SU–D1100, использующей 18-разрядный АЦП. 16-разрядные слова, записываемые на ленту, получаются после цифровой обработки в специальной схеме. Кроме того, эта модель использует четыре 18-разрядных ЦАП, по два преобразователя на канал. Это делается для уменьшения искажений сигнала вблизи "нулевой" точки характеристики квантования. Каждый ЦАП одного канала преобразует только одну (положительную или отрицательную) половину сигнала, которые затем суммируются с помощью дифференциального усилителя. Цифровой сигнал на вход ЦАП поступает с цифрового фильтра передискретизации, вычисляющего значение ИКМ-сигнала с 18-разрядной точностью. Стои-

мость модели SU–D1100, выпущенной фирмой Matsushita El., составляла 250000 иен.

На качество звучания влияет уровень наводок от цифровых блоков. Наводки создаются, в основном, соединительными кабелями между платами. Для борьбы с наводками фирма Onkyo в модели DT–2001 применила оптоволоконные соединения для передачи не только цифровых, но и аналоговых сигналов. По мнению фирмы, это наиболее эффективный способ борьбы с наводками от цифровых схем. Для питания блоков магнитофона, изолированных с помощью оптоволоконных соединений, используются семь отдельных источников питания, в том числе – отдельный трансформатор для питания аналоговой части. Всего модель содержит 13 внутренних оптоволоконных соединений, а также имеет цифровые оптические входы-выходы.

Все стационарные цифровые магнитофоны имеют нерегулируемый линейный выход для подключения к внешнему усилителю, а также телефонный усилитель, позволяющий прослушивать записи с помощью головных телефонов. Аппараты по размерам мало отличаются друг от друга: длина – в пределах 420–470 мм, высота – 90–110 мм, ширина – 300–420 мм. Масса стационарных моделей находится в пределах 7–14 кг. Основной вклад в массу моделей вносят прочные стальные или алюминиевые шасси и трансформаторы блока питания. Достаточно прочный корпус и шасси для стационарных моделей необходимы при использовании их в качестве нижнего этажа бытового блочного радиокомплекса.

В большинстве стационарных моделей для загрузки кассеты использован линейно-скользящий механизм и только в некоторых моделях – механизм с фронтальной загрузкой (RX–X5, Sharp). Все стационарные модели комплектуются пультами дистанционного управления на инфракрасном излучении, полностью дублирующими все органы управления аппаратом. Некоторые фирмы (например, Sharp) выполняют пульты с ЖКИ-индикатором, дублирующим показания индикатора магнитофона. В качестве многофункциональных индикаторов самих магнитофонов, в основном, используются флюоресцентные вакуумные многоцветные индикаторы, имеющие высокую яркость свечения.

Лентопротяжные механизмы магнитофонов первого поколения, как правило, имели 4 прямоприводимых двигателя, не считая двигателя заправки ленты и двигателей механизма загрузки кассеты. Для R-DAT-магнитофонов, выпущенных в 1988 году, а также для носимых и автомобильных моделей характерно уменьшение числа двигателей ЛПМ до трех и применение механической системы поддержания постоянного натяжения ленты вместо электронной.

Автомобильные модели имеют небольшие размеры (180x50x160 мм), в них отсутствует функция записи. По сравнению с автомобильными проигрывателями компакт-дисков проигрыватели R-DAT характеризуются повышенной стойкостью к вибрациям и большим диапазоном рабочих температур (для проигрывателя компакт-дисков максимальное

значение рабочей температуры равно 50 °С, а для R-DAT-*магнитофонов* фирмы Clarion PA–5500–A – 70 °С). Средняя масса автомобильных моделей – около 2,5 кг. Загрузка кассеты осуществляется фронтальным механизмом. Большинство автомобильных моделей по скорости поиска не уступают стационарным. Цены на автомобильные R-DAT-проигрыватели в 1987 году находились в пределах 140000–200000 иен. Кроме чисто магнитофонных проигрывателей в 1988 году рядом фирм стали выпускаться автомобильные магнитолы, например, модель CQ–D11D фирмы Matsushita, имеющая в своем составе тюнер с синтезатором частоты. К особенностям этой модели можно отнести использование в ЛПМ БВГ диаметром 15 мм, а также построение электронной части на девяти специализированных БИС.

В 1987 году на рынок было выпущено три модели носимых магнитофонов формата R-DAT. Модель *SV*–MD1 фирмы Matsushita имеет размеры 210x40x122 мм, что достигнуто применением БВГ диаметром 15 мм и 11 специализированных БИС. Напряжение питания – 6 В, масса – 1,08 кг. Модель обладает скоростью поиска, в 60 раз превышающей скорость воспроизведения, и возможностью 32-ступенчатого программирования процесса воспроизведения. Цена модели – *300000* иен.

Модель TDC–D10 фирмы Sony имеет размеры 283x53,6x175 мм и обладает функцией "автодаты": при записи на ленту в зоне субкода записывается время и дата проведения записи. При воспроизведении эта информация может отображаться на индикаторе. Цена – 250000 иен.

Малогабаритный магнитофон *DA*–*1* фирмы *Casio* имеет размеры 119x43x145 мм, массу 730 г. Потребляемая мощность – 3,5 Вт. Магнитофон обладает возможностью "помечать" производимые записи с помощью вводимого перед записью обозначения, которое может состоять из 28 букв или цифр. При воспроизведении эта информация может быть *введена на индикатор. Цена – 148000 иен.*

Все три модели имеют микрофонные усилители и комплектуются высококачественными стереомикрофонами. В качестве механизма загрузки используется поднимающийся кассетоприемник. Для портативных R-DAT-магнитофонов характерно использование специальных *БИС, рассчитанных на низкое напряжение питания, в том числе – БИС* АЦП и ЦАП. Для достижения малых габаритов используются многослойные печатные платы с высокоплотным монтажом. Многофункциональные индикаторы выполняются на основе жидкокристаллических панелей. По качеству воспроизведения переносимые модели практически *не уступают стационарным: например, модель SV–MD1 имеет частотный* диапазон 15–22000 Гц, отношение сигнал-шум – 90 дБ и коэффициент искажений – 0,005 %. Некоторые параметры R-DAT-магнитофонов первого поколения приведены в табл. 16.

Ожидается появление на рынке переносных цифровых магнитол, включающих в себя проигрыватель компакт-дисков и R-DAT-магнитофон. Образцы такой продукции демонстрировались фирмами Sharp и Toshiba осенью 1987 года.

Таблица 16

Параметры		Модель						
		XD-001	DTC-1000ES	XD-Z1100	DAT-9000	XC-100DT	SV-D1000	RX-X100
запись	48 кГц 16 разрядов	+	+	+	+	+	+	+
	32 кГц 16 разрядов	+	+	–	+	–	–	–
	32 кГц 12 разрядов	–	–	+	–	+	–	–
воспроизведен.	48 кГц 16 разрядов	+	+	+	+	+	+	+
	44,1 кГц 16 разрядов	+	+	+	+	+	+	+
	32 кГц 16 разрядов	+	+	–	+	–	–	–
	32 кГц 12 разрядов	–	–	+	–	+	–	–
Диапазон частот, Гц		2–22000 (±0,05 дБ)		5–22000 5–14500*	2–22000	5–22000	1–22000	5–22000(48 кГц) 5–20000(44,1 кГц)
Динамический диапазон, дБ		90	90	90	90	90	90; 96**	90
Отношение сигнал-шум, дБ		92	92	90	92	92	93	92
Детонация		ниже пределов измерения						
Габариты, мм		430x116,5x421	470x100x420	435x112x320	435x93x320	435x100x308	430x352x109	430x95x300
Масса, кг		11,7	12	8,5	7	8,4	11,5	–
Стоимость, тыс.иен (1988 г.)		188	200	198	198	198	198	199

Примечание : * – в режиме долгоиграния; ** – в режиме воспроизведения

Из других применений цифровой звукозаписи с помощью вращающихся головок можно отметить следующие.

Фирмы Hitachi, Sony, HP планируют поставку внешних запоминающих устройств (ВЗУ) для ЭВМ, выполненных на основе стандарта R-DAT. Емкость ВЗУ на цифровой кассете составляет 1-1,3 Гбайт, т.е. в 8 раз больше, чем в современных кассетах с магнитной лентой шириной 6,3 мм. Для сравнения: емкость 1 Гбайт эквивалентна 40 тыс. страниц формата 297x210 мм или 93 томам энциклопедии; она в 500-1000 раз больше, чем емкость накопителей на гибких магнитных дисках.

Общая стоимость R-DAT-магнитофона, контроллера и интерфейса фирмы Hitachi-3448 долларов. По прогнозу фирмы Sony к 1992 году объем продажи R-DAT-накопителей для ЭВМ различных классов достигнет 1 млн штук в год.

Основные характеристики накопителя RX- 100 фирмы Sharp:

– *максимальная скорость передачи данных* – 1,55 МБ/с;
– средняя скорость передачи данных – 170 КБ/с;
– вероятность появления ошибочного символа – 10^{-15};
– максимальное время доступа – 40 с;
– размеры кассеты – 73x10,5x54 мм;
– габариты накопителя – 146x82,6x203 мм;
– масса – 1,8 кг.

Южнокорейская фирма Samsung разработала камкордер (телевизионная камера с малогабаритным видеомагнитофоном), работающий с кассетой в стандарте R-DAT. В связи с тем, что ширина ленты составляет 3,81 мм, такой камкордер назвали четырехмиллиметровым. Размеры модели – 104x214x136 мм, масса – 1,15 кг. Скорость движения ленты – 16,08 мм/с, время записи – 80 минут. В ЛПМ используется БВГ диаметром 30 мм с двумя головками. Внедрение данных камкордеров сдерживается из-за отсутствия стандарта на видеозапись на R-DAT-кассету.

ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА ЗВУКОЗАПИСИ "КОМПАКТ-ДИСК"

Общее представление о цифровых звуковых магнитофонах будет неполным без приведения хотя бы кратких сведений о лазерных цифровых компакт-дисковых системах.

Появившись раньше, чем другие цифровые системы как массовая аппаратура, компакт-дисковые проигрыватели предопределили многие технические, эксплуатационные и потребительские характеристики последующих видов цифровой аудиотехники.

Постоянное сопоставление CD- и R-DAT-систем, их комплексное использование и взаимообогащение вызывают интерес и дискуссии у потребителей и специалистов.

Система "компакт-диск" (CD) состоит из диска, который содержит звуковую программу, записанную в цифровом виде, и проигрывателя, воспроизводящего записанную информацию с помощью луча лазера. Диаметр компакт-диска составляет 120 мм, толщина – 1,2 мм. Компакт-

диск может быть помещен в тонкий конверт или специальную кассету, что обеспечивает портативность и удобство его хранения в домашних условиях.

Качество звучания в системе CD определяется, как и в любой цифровой системе звукозаписи, параметрами аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразований. Частота дискретизации для этой системы принята равной 44,1 кГц, число разрядов квантования – 16 при линейной характеристике квантования. Выбор дробного значения частоты дискретизации был обусловлен использованием для формирования мастер-ленты комбинации видеомагнитофона и ИКМ-процессора, частота дискретизации которого при использовании видеомагнитофона, работающего в системе PAL, составляла 44,1 кГц. Мастер-лента, как уже упоминалось, используется для записи первой копии диска.

Цифровая запись с такими параметрами обеспечивает высокие качественные показатели системы CD:

– диапазон воспроизводимых частот – от единиц Гц до 20 кГц;

– отношение сигнал-шум – не менее 90 дБ;

– динамический диапазон – не менее 90 дБ (у грампластинки – не более 70 дБ);

– коэффициент нелинейных искажений – 0,003% при максимальном уровне сигнала (у грампластинки – 0,3%);

– коэффициент детонации – ниже пределов измерения;

– разделение каналов – 90 дБ (у грампластинки – 15–30 дБ).

В отличие от грампластинки в системе CD отсутствуют рокот и шумы, связанные с запыленностью и повреждениями поверхности носителя информации. Отсутствует также износ компакт-диска и считывающей головки.

Запись цифровых сигналов в отличие от обычной грампластинки осуществляется только с одной стороны компакт-диска. Зона записи сигнала ограничена. Ее внутренний диаметр равен 50, а наружный – 116 мм. Вне этой зоны располагается зона "ввода и вывода", содержащая информацию, которая позволяет автоматизировать процесс проигрывания. Компакт-диск не имеет канавки записи, характерной для грампластинки – значения цифрового сигнала записываются на поверхности диска с помощью маленьких углублений, называемых питами. Расположенные в ряд питы образуют дорожку записи, которая наносится на диск в виде спирали, направленной от центра диска к его краю. Расстояние между соседними витками спирали равно 1,6 мкм. По сравнению с долгоиграющей пластинкой, где шаг между канавками составляет около 160 мкм, здесь плотность записи очень высока. Благодаря этому обеспечивается непрерывное воспроизведение одной стороны диска диаметром 120 мм в течение более одного часа.

Стабильное воспроизведение сигнала с таких узких дорожек записи стало возможным благодаря достижениям в некоторых областях развития техники сервопривода, оптики, технологии полупроводниковых лазеров и техники цифровой обработки сигналов.

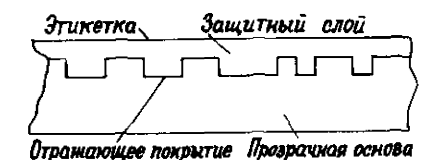


Рис. 95. Разрез компакт-диска

В упрощенном виде разрез компакт-диска показан на рис.95. На поверхности прозрачного пластмассового диска формируют питы. Затем на диск со стороны пит наносится тонкая металлическая отражающая пленка, которая покрывается непрозрачным защитным слоем. Защитный слой обычно используется также в качестве этикетки. Дорожка записи, таким образом, остается внутри компакт-диска. Считывание сигнала производится со стороны прозрачной основы с помощью сфокусированного луча лазера, который, отражаясь от поверхности металлического слоя, попадает в оптическую систему считывающей головки. Обычно отраженный слой изготавливается из алюминия, что придает компакт-диску характерный серебристый цвет. Толщина его – около 0,1 мкм.

Материал прозрачной основы должен быть теплостойким, влагостойким, хорошо формироваться и иметь определенные оптические свойства. Защитный слой изготавливается из непрозрачной твердой пластмассы.

Существенным достоинством системы CD является отсутствие контакта между поверхностью диска и считывающей головокой. Так как луч света, выполняющий роль воспроизводящей иглы, необходимо сфокусировать до светового пятна, имеющего размер одного порядка с размером пит, в качестве источника света используется лазер. Любой другой источник света на дает возможности получить световое пятно приемлемых размеров. Прогресс последних лет привел к появлению допустимых по цене полупроводниковых лазеров, имеющих малые размеры и позволяющих устанавливать их в малогабаритную оптическую считывающую головку проигрывателя CD. Необходимая мощность излучения лазеров составляет 2–3 мВт.

Как происходит считывание цифровых сигналов, записанных на компакт-диске ?

Луч лазера, сфокусированный на границе отражающего слоя, через прозрачную основу падает на дорожку записи. Если он попадает на участок, где нет пит, то почти полностью отражается обратно. Если луч попадает на участок, где расположен пит, то он рассеивается. Детектором излучения является фотодиод, регистрирующий мощность отраженного луча. Таким образом, различное расположение и длина дорожки записи при воспроизведении вызывает модуляцию мощности отраженного луча, попадающего на фотодиод. Фотодиод преобразует модуляцию светового потока в электрический сигнал. Длина пит может изменяться от 0,9 до 3,1 мкм и принимать девять значений.

Так как луч лазера фокусируется на поверхности отражающего слоя, мелкие царапины и пылинки, неизбежно присутствующие на диске, не

влияют на воспроизводимый сигнал. Эти побочные вкрапления, конечно, попадают в область прохождения луча лазера, но они не вносят искажений в регистрируемый фотодетектором сигнал, т.е. помехи воспроизведению отсутствуют.

В отличие от грампластинки, вращающейся с постоянной скоростью, частота вращения компакт-диска при воспроизведении изменяется от 500 до 200 об/мин. Это делается для обеспечения постоянного значения линейной скорости (1,25 м/с). Поддержание постоянной линейной скорости позволяет осуществлять запись пит с одинаковой плотностью по всей поверхности компакт-диска, что увеличивает поверхностную плотность записи. Если бы такой способ записи возможно было использовать для аналоговой грампластинки, длительность ее воспроизведения увеличилась бы в 1,7 раза. Регулирование частоты вращения диска в проигрывателе CD осуществляется специальной схемой на основе измерения временных интервалов, получаемых при детектировании воспроизводимого цифрового сигнала. Поскольку частота вращения компакт-диска весьма высока, на валу двигателя отсутствует столь привычный для проигрывателей грампластинок диск. Компакт-диск устанавливается непосредственно на вал двигателя.

В связи с малыми размерами пит и шагом дорожек существуют проблемы обеспечения точного следования воспроизводимого луча по дорожке записи. Реально трудно обеспечить точное совмещение оси двигателя с центром диска. Неизбежно существует смещение, вызываемое эксцентриситетом и погрешностью установки компакт-диска на валу двигателя. Из-за неидеальности производственного процесса при тиражировании компакт-дисков возможно также некоторое искривление дорожек записи. Слежение за дорожкой записи при воспроизведении осуществляется системой автотрекинга.

Кроме того, производственные возможности и условия эксплуатации не позволяют иметь абсолютно плоский диск. Реально биение поверхности диска при вращении не может быть сделано менее 0,5 мм. Это создает определенные трудности в обеспечении правильной фокусировки луча лазера на отражающем слое, поскольку глубина пит составляет 0,1 мкм. Чтобы избежать расфокусировки при воспроизведении, используется специальная сервосистема, поддерживающаяся постоянным расстоянием между компакт-диском и объективом. Эта система носит название системы автофокусировки. Таким образом, в процессе воспроизведения луч лазера постоянно автоматически фокусируется на отражающем слое компакт-диска и непрерывно следит за дорожкой записи. Отраженный луч лазера модулируется в соответствии с наличием или отсутствием пит на дорожке записи. С помощью фотодатчика он преобразуется в электрический сигнал.

Упрощенная структурная схема компакт-дискового проигрывателя приведена на рис.96. Как и в случае магнитной цифровой записи, сигнал, поступающий с оптической воспроизводящей головки, подвергается коррекции с помощью специального фильтра (для улучшения формы

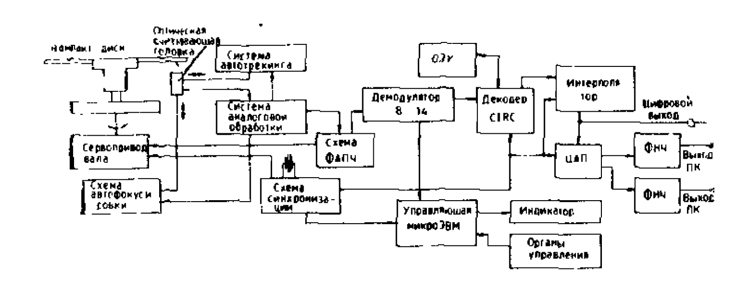


Рис. 96. Структурная схема компакт-дискового проигрывателя

импульсов и уменьшения взаимного влияния близко расположенных пит). Затем скорректированный сигнал преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов и далее с помощью схемы ФАПЧ – в цифровые данные. Затем цифровой сигнал поступает на демодулятор канального кода 8–14, разработанный специально для системы CD. Применение канального кодирования для оптической записи вызвано необходимостью обеспечения свойств самосинхронизации записанного сигнала для работы ФАПЧ, а также невозможностью осуществления функций автотрекинга при длительном отсутствии пит на дорожке записи (например, когда все 16 бит, выражающие цифровое значение сигнала, являются нулями), так как слежение за дорожкой записи осуществляется по питам. Кроме того, необходимо ограничить определенным образом спектр сигнала для согласования воспроизводимого сигнала с характеристиками канала воспроизведения.

При модуляции в коде 8–14 символы по 8 бит преобразуются в канальные комбинации по 14 бит согласно кодовой таблице. Исходя из желания иметь не очень малое значение $T_{мин}$, выбираются такие комбинации, которые содержат не менее двух нулей между единицами. Чтобы обеспечить эти условия, для выбора 256 комбинаций необходимо 14 бит. Для уменьшения низкочастотных составляющих сигнала в спектре модулированным канальным кодом 8–14 число нулей между единицами устанавливается не более 10, что ограничивает значение $T_{макс}$. Для сопряжения между канальными комбинациями из 14 бит вводятся дополнительные 3 бита. Задача сопряжения – не допустить более чем десять нулей между единицами.

После модуляции канального кода цифровой сигнал поступает в декодер помехоустойчивого кода, который обнаруживает и исправляет ошибки, возникшие при изготовлении компакт-диска и в процессе его эксплуатации. Вероятность появления ошибочных значений цифрового сигнала при воспроизведении оценивается значением 10^{-5}. Ошибки вызываются дефектами, возникающими в процессе производства диска для первого оригинала и тиражировании компакт-дисков: царапинами, превышающими допустимые размеры, которые появляются на поверх-

ности диска в процессе эксплуатации, и нарушениями сигналов синхронизации и управления.

В системе CD используется корректирующий код Рида-Соломона с перемежением (CIRC). Операции при декодировании производятся с 8-разрядными символами, представляющими собой половинки 16-разрядных слов ИКМ-сигнала.

В коде CIRC используют две ступени кодирования: C1 и C2, характеризуемые следующим образом:

C1 : n = 32, k = 28;
C2 : n = 28, k = 24,

где k – количество символов основных данных (полуслов ИКМ-сигнала); n – количество символов кодового слова (с проверочными символами).

При декодировании данные, поступающие с выхода демодулятора канального кода 8–14, декодируются с помощью кода C1, а затем – C2. Код C1 обнаруживает пакеты ошибок и исправляет одиночные случайные ошибки. При обнаружении ошибок,которые не могут быть исправлены на первой ступени декодирования, они отмечаются флагами стирания, которые используются при декодировании на второй ступени C2. Код C2 корректирует, в основном, пакеты ошибок и случайные ошибки, которые не могут корректироваться на первой ступени. Код C2 позволяет скорректировать до двух ошибок или до четырех стираний. При этом длина участка дорожки записи, на которой можно корректировать ошибки, составляет около 2,4 мм.

В процессе декодирования производится операция деперемежения и восстановления временного масштаба ИКМ-сигнала. Для этой цели используется ОЗУ. Емкость ОЗУ может составлять от (2 кбит x 8) до (8 кбит x8)в зависимости от условий эксплуатации конкретной модели проигрывателя (для носимых и автомобильных моделей необходим больший объем ОЗУ с целью компенсации больших значений детонации скорости вращения диска).

Ошибочные значения ИКМ-сигнала, которые не могли быть исправлены системой коррекции ошибок, маскируются с помощью интерполяции перед подачей на цифро-аналоговый преобразователь. Длина участка дорожки компакт-диска, ошибки которого могут быть скрыты с помощью интерполяции, составляет 8,16 мм. Необходимо отметить, что для коррекции ошибки на длине дорожки 2,4 мм обязательно отсутствие ошибок на участке дорожки, в несколько раз превышающем по длине поврежденный участок. Это же верно и в случае интерполяции. Поэтому повреждения таких размеров корректировать затруднительно.

С выхода интерполятора отсчеты ИКМ-сигнала поступают на ЦАП или при использовании передискретизации – на вход цифрового фильтра. С выхода ЦАП сигнал поступает на аналоговые ФНЧ, а затем – на линейный выход проигрывателя. Кроме аналоговых выходов в некоторых моделях предусматривается цифровой выход для обеспечения возможности подключения цифрового предварительного усилителя, а также для

обеспечения перезаписи на цифровой магнитофон. В качестве управляющей схемы используется однокристальная микроЭВМ, обеспечивающая гибкое управление процессом воспроизведения с помощью данных субкода, записанных на диске. Данные субкода содержат информацию о номерах фрагментов, записанных на диске, времени звучания каждого из них, начале и окончании фрагментов. При наличии многофункционального индикатора возможно выведение информации оглавления диска. Одной из существенных особенностей компакт-диска является возможность быстрого отыскания (в престижных моделях время поиска составляет не более 0,5 с) начала фрагмента записанной программы.

Запись и тиражирование компакт-дисков осуществляется по схеме, приведенной на рис. 97.

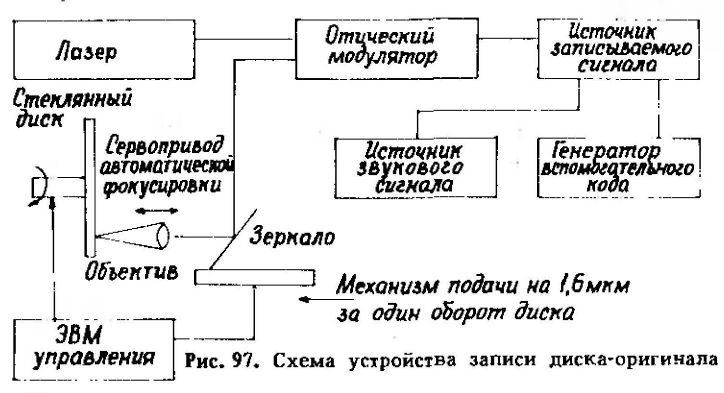


Рис. 97. Схема устройства записи диска-оригинала

Диск для первого оригинала изготавливают из полированного стекла, обработанного с высокой точностью. Поверхность диска покрывается слоем фоточувствительного материала, при этом толщина слоя, соответствующая глубине будущих пит, поддерживается одинаковой на всей поверхности диска. На всех стадиях изготовления диск тщательно проверяют, поскольку дефекты в дальнейшем будут перенесены на компакт-диск. В соответствии с цифровым сигналом запись первого оригинала производится модуляцией светового потока луча лазера. Для модуляции луча используется специальный высокоскоростной оптический затвор. Система автофокусировки обеспечивает постоянное расстояние между фокусирующей линзой и поверхностью диска, которое может изменяться вследствие неплоскостности поверхности диска. Шаг между витками спирали задается с помощью системы сервопривода, снабженного высокоточным исполнительным механизмом. На основании данных о положении светового пятна относительно центра диска изменяется частота вращения двигателя. Управление сервоприводом осуществляется с помощью ЭВМ.

После записи первого оригинала производится проявление светочувствительного слоя и металлизация поверхности диска. С помощью гальванопластики с первого оригинала получают второй оригинал

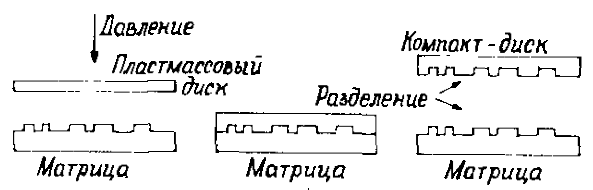


Рис.98. Тиражирование компакт-дисков

(металлический), с которого снимаются промежуточные копии, а с них– множество матриц. Матрицы используются при тиражировании компакт-дисков. Процесс тиражирования напоминает производство обычных грампластинок (рис.98). После нанесения пит с матрицы на прозрачную основу компакт-диска напыляется отражающий слой, а затем – защитный слой и формируется этикетка. Процесс производства компакт-диска на этом заканчивается. Производство компакт-дисков требует особых условий, сходных с условиями производства больших и сверхбольших интегральных схем, так как размеры пит не больше размера формируемых элементов БИС.

Благодаря отсутствию механического износа при воспроизведении долговечность компакт-диска теоретически бесконечна. Реально срок жизни компакт-диска определяется качеством материалов,из которых он сделан. Одна из причин возможного уменьшения срока службы диска – изменение оптических свойств основы под воздействием внешних условий и процесса старения самого материала. Кроме того,алюминиевый отражающий слой, обычно используемый в CD, со временем окисляется, что уменьшает его коэффициент отражения. Поэтому наиболее долговечны компакт-диски с отражающим слоем, выполненным из золота, которое менее подвержено окислению.

Кроме записи звуковых программ в зонах субкода компакт-диска возможна запись неподвижных изображений. При оснащении проигрывателя CD специальным устройством к нему можно подключить видеомонитор, на который во время воспроизведения звуковой программы будут передаваться неподвижные изображения, схемы, рисунки и т.п.

Время формирования полноразмерного кадра неподвижного изображения высокого качества составляет от 30 до 157 с, а время вывода графической информации на экран – от 2 до 20 с. Существующий стандарт на компакт-диск учитывает возможность четырехканальной записи при увеличении частоты вращения диска в 2 раза. При этом плотность записи не изменяется, а продолжительность воспроизведения сокращается до 37 минут. В четырех каналах можно передавать квадрофонический сигнал.

Широкое применение системы CD, начатое в 1982 году, способствовало дальнейшему развитию как самой системы звучания, так и разнообразных применений техники записи сигналов на компакт-диск.

В 1988 году рядом крупных японских фирм была начата поставка на рынок компакт-дисков с диаметром 8 мм (CD–single). Имея адаптер, эти диски можно воспроизводить на обычных проигрывателях компакт-

дисков. Время звучания CD такого диаметра 20 минут. Стоимость этих дисков в 3–4 раза меньше стоимости компакт-дисков диаметром 12 см, что в совокупности с меньшим временем воспроизведения позволяет потребителю более гибко формировать фонотеку в соответствии со своим вкусом. Одновременно с началом выпуска CD диаметром 8 см было начато производство миниатюрных носимых проигрывателей, рассчитанных на воспроизведение этих дисков. Примером такого "карманного" проигрывателя является модель D–88 фирмы Sony, поступившая в продажу в 1988 году. Габариты проигрывателя – 94,5x32,9x99 мм, масса – 400 г. Эта модель может воспроизводить и компакт-диски диаметром 12 см, при этом часть диска остается вне корпуса проигрывателя.

Кроме данных проигрывателей на рынке в 1987–1988 годах появился ряд компакт-дисков стандартного размера (12 см), отличающихся назначением: видеозвуковой диск (CD–V), интерактивный (взаимодействующий) диск (CD–I) и компакт-диск, используемый в качестве внешней постоянной памяти компьютера (CD–ROM).

Видеозвуковой диск содержит 25-минутную запись: 5 минут видеопрограммы с высоким качеством изображения и 20 минут звуковой программы. Запись звука осуществляется аналогично стандарту на компакт-диск, что позволяет воспроизводить звуковую часть программы видеозвукового диска на обычном проигрывателе CD. Запись изображения осуществляется в аналоговом режиме, аналогично системе видеодиска "Laservision" (LV). Звуковое сопровождение видеопрограммы записывается в цифровой форме, при этом кодирование звукового сигнала соответствует стандарту на компакт-диск. Таким образом, видеозвуковой диск при наличии специального проигрывателя и бытового телевизора, подключенного к этому проигрывателю, позволяет просмотреть 5-минутный видеоклип и прослушать 20-минутную звуковую программу, причем в течение всех 25 минут обеспечивается высококачественное звуковоспроизведение.

Видеозвуковые диски в 1988 году выпускались только с записью видеоизображения по системе VTSC и PAL. Запись видеоизображения по системе SECAM в стандарте на видеозвуковой диск не оговорена.

Запись звуковой части программы осуществляется в зоне, ограниченной диаметрами 50–74 мм. Воспроизведение осуществляется с относительной скоростью, определяемой стандартом на компакт-диск. Запись видеопрограммы ведется в зоне 78–116 мм, причем относительная скорость воспроизведения значительно возрастает по сравнению с компакт-дисковым – с 1,2–1,4 до 10–12 м/с, что требует увеличения скорости вращения диска до 1512–2700 об/мин. Ширина дорожки записи в зоне видеопрограммы – 1,7 мкм. Поэтому проигрыватель видеозвуковых дисков должен изменять скорость вращения диска при воспроизведении видеопрограммы, а также содержать считывающую оптическую систему "Laservision". Такой проигрыватель может с успехом воспроизводить и обычные компакт-диски, а также видеодиски системы LV. Некоторые фирмы начали производство подобных комбинированных

проигрывателей, работающих с компакт-дисками диаметром 8 и 12 см и видеодисками диаметром 20 и 30 см. Примером такого проигрывателя является модель VIP–32C фирмы Yamaha стоимостью около 1000 долларов. В отличие от звукового компакт-диска, имеющего серебристую окраску, видеозвуковой диск имеет золотистый оттенок.

Интерактивный диск (CD–I) предназначен для создания диалоговых обучающих и информационно-развлекательных комплексов и используется совместно с персональным компьютером. Кроме того, в состав комплекса входит усилитель с акустическими системами и иногда дополнительный видеомонитор. Интерактивный диск используется как внешнее запоминающее устройство и может содержать запись звуковых программ, графическую информацию, печатный текст, неподвижные видеоизображения высокого качества. При кодировании звуковых сигналов используется адаптивная дифференциальная импульсно-кодовая модуляция. В зависимости от требуемого качества звукового сопровождения время записи может составлять от 4,5 до 19 часов. В первом случае качество звучания аналогично звучанию высококачественной грампластинки, во втором – качеству передач амплитудно-модулированного радиовещания. Видеоизображения также могут быть записаны с различным уровнем качества. Первый уровень соответствует качеству изображения бытового телевизора, последний – качеству перспективной системы телевидения высокой четкости. Время, требующееся для смены полноразмерного кадра изображения, составляет около 0,6 с. Объем печатного текста, записанного на интерактивном диске, может быть порядка 10000 страниц.

Для воспроизведения интерактивных дисков необходим специальный проигрыватель, работающий под управлением операционной системы компьютера. В то же время на этом проигрывателе можно воспроизводить и обычные компакт-диски, а также диски CD–ROM.

Диски CD–ROM используются для постоянного хранения различных программных средств, необходимых при решении определенных задач с помощью компьютера. Объем памяти такого диска составляет 560 Мбайт. Кроме того, такие диски могут использоваться для хранения некоторых базовых данных: словарей, энциклопедий и др. справочников.

СИСТЕМА ЦИФРОВОЙ ЗВУКОЗАПИСИ НА МАГНИТО-ОПТИЧЕСКИЙ ДИСК

Работы над созданием цифровой звукозаписи, имеющей такое достоинство компакт-диска, как бесконтактное считывание сигнала с носителя, а также обладающей функцией перезаписи фонограммы, ведутся достаточно давно. Уже в 1984 году японская фирма Sanyo продемонстрировала опытный образец диска, позволяющего проводить перезапись, и проигрывателя этого диска с функцией записи (дискового магнитофона). Кроме записи-воспроизведения звуковых программ при применении специальных дисков аппарат позволял воспроизводить

обычные компакт-диски. Система получила название E-DAD*).

В качестве носителя в этой системе записи используется так называемый магнито-оптический диск. В отличие от компакт-диска, на котором сигнал записывается с помощью углублений, запись сигналов на магнито-оптический диск производится путем изменения намагниченности магнитного слоя. Отличие от обычного магнитофона заключается в том, что процессы записи и воспроизведения осуществляются при помощи лазерного луча.

При магнито-оптической записи на тонкую магнитную пленку, покрывающую поверхность диска, направляется лазерный луч, обеспечивающий локальное повышение температуры на засвеченном участке. Вектор намагниченности нагретого участка магнитного слоя ориентируется параллельно внешнему магнитному полю. Так как коэрцитивная сила магнитного материала при повышении его температуры уменьшается, становится возможной запись сигналов достаточно слабым внешним магнитным полем. На холодные участки магнитного слоя слабое внешнее магнитное поле влияния не оказывает. Процесс магнито-оптической записи поясняет рис. 99.

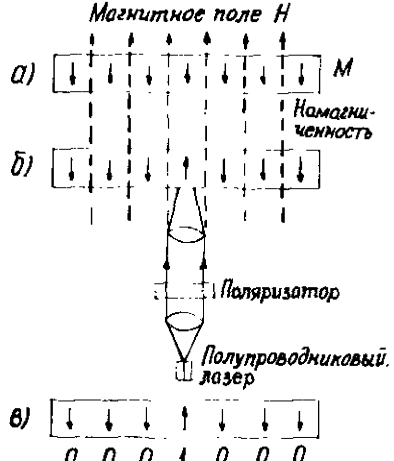


Рис.99. Процесс магнито-оптической записи: а) в исходном состоянии домены магнитного слоя ориентированы определенным образом; б) при локальной засветке лучом лазера происходит ориентация доменов нагретого участка в направлении внешнего магнитного поля; в) после окончания процесса записи намагниченность сохраняется

При воспроизведении используется магнито-оптический эффект Керра: при отражении света от намагниченных участков происходит изменение плоскости поляризации отраженного света в зависимости от направления намагниченности освещаемого участка. Эти изменения воспринимаются оптической системой, сигналы с выхода которой преобразуются в цифровой сигнал, а затем — в высококачественные звуковые сигналы. Слежение за дорожкой записи осуществляется с помощью предварительно сформированной (с шагом 1,6 мкм) спиральной направляющей на поверхности диска.

Процесс изготовления магнито-оптических дисков во многом похож на процесс изготовления компакт-дисков. Сначала формируется матрица,

*) E-DAD — Erasable Digital Audio Disk — стираемый цифровой звуковой диск.

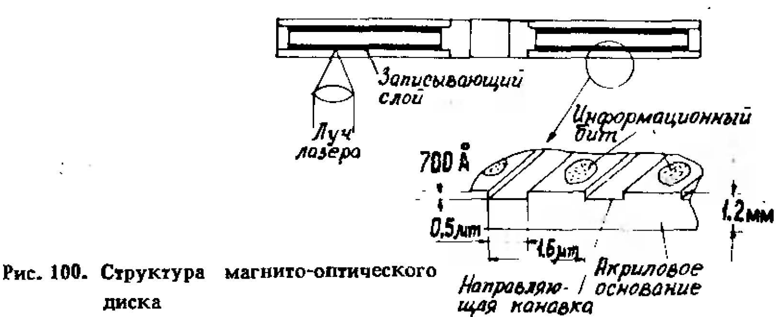


Рис. 100. Структура магнито-оптического диска

на поверхность которой наносится спиральная направляющая. Одна матрица позволяет репродуцировать более 10000 оснований дисков, снабженных спиральными канавками. Основания прессуются на прозрачную пластмассовую основу толщиной 1,2 мм. Затем производится нанесение магнитного слоя, поверх которого накладывается защитный слой. При необходимости сформировать диск с двухсторонней рабочей поверхностью два диска склеиваются вместе защитными слоями. Разрез магнито-оптического диска (МОД) показан на рис.100.

В качестве магнитного слоя в МОД используются многослойные (3–4-слойные) структуры из пленок различных металлов и редкоземельных элементов. В качестве материалов пленок применяются неодим, железо, кобальт, диспрозий, тербий, гадолиний и многие другие элементы. Толщина магнитного слоя около 0,1 мкм.

Основная проблема, которую пытаются решить разработчики диска–увеличение отношения сигнал-шум. Дело в том, что изменение плоскости поляризации при отражении света от противоположно намагниченных участков магнитного слоя мало и составляет около 0,3–0,5°. Небольшое отношение сигнал-шум заставляет увеличивать скорость вращения МОД, что сокращает время звучания этих дисков по сравнению с временем звучания компакт-дисков. Например, время звучания магнито-оптических дисков фирмы Sanyo составляет 45 минут при одинаковом диаметре с компакт-диском (120 мм). Увеличение общего времени звучания МОД вдвое достигается использованием для записи-воспроизведения обеих сторон диска, но это вызывает некоторое неудобство в обращении с ними по сравнению с компакт-диском. Рядом фирм ведутся работы по увеличению времени звучания МОД до двух часов.

Для осуществления записи мощность лазера в дисковом МОД-магнитофоне должна быть значительно больше, чем мощность лазеров компакт-дисковых проигрывателей. В зависимости от характеристик используемого МОД мощность лазера при записи должна быть порядка 10–20 мВт. Прогресс в области создания материалов магнитного слоя МОД позволит, видимо, снизить в ближайшее время необходимую мощность лазера до 5 мВт.

Оригинальной особенностью системы E-DAD является трехлучевой полупроводниковый лазер, каждый из лучей которого можно включить

или выключить в зависимости от выполняемой операции. Управляющий луч лазера применяется в системе автотрекинга и автофокусировки. Стирающий луч убирает ранее записанные сигналы, а записывающий – записывает новую (или воспроизводит старую) информацию. Использование такого метода позволяет осуществлять перезапись диска без предварительной подготовки (в ранних моделях для подготовки к записи МОД сначала подвергался циклу стирания). Наличие большого числа общих функциональных блоков с проигрывателем CD позволяет дисковому магнитофону системы E-DAD при некотором усложнении оптической головки воспроизводить обычные компакт-диски, так как цифровой сигнал на МОД записывается в соответствии со стандартом на компакт-диск. Но совместимость этих двух систем оказывается неполной: запись, сделанную на МОД, невозможно воспроизвести на обычном компакт-дисковом проигрывателе.

По сравнению с R-DAT система E-DAD имеет определенные преимущества. Это, прежде всего, отсутствие износа носителя и оптической головки при записи-воспроизведении, а также более быстрое время поиска фрагментов (0,5 с). Количество циклов перезаписи МОД практически неограничено, долговечность существующих дисков – не менее 10 лет. В то же время существуют серьезные недостатки, тормозящие широкое распространение E-DAD-системы в качестве бытовой системы цифровой звукозаписи. Один из них – высокая цена магнитооптических дисков, определяемая сложностью изготовления диска и использованием дорогостоящих компонентов при формировании магнитного слоя. Кроме того, затруднена ограгизация массового выпуска дисков с готовыми записями, так как запись должна производиться в реальном масштабе времени. МОД не так удобен в эксплуатации, как небольшая DAT-кассета. Один из главных сдерживающих факторов – отсутствие международного стандарта на E-DAD-систему. Тем не менее, французская компания Thomson заявила в 1988 году о своем намерении организовать выпуск дисковых магнитофонов E-DAD. По-видимому, на фоне возрастающего выпуска R-DAT-магнитофонов широкого распространения данная аппаратура не получит. В профессиональной же сфере при использовании дисковых магнитофонов E-DAD (в студиях звукозаписи) они имеют определенные преимущества перед другими записывающими системами.

Наиболее перспективным направлением применения магнитооптической записи, по мнению специалистов, является область накопителей данных для ЭВМ различных классов, где не так важна стоимость диска и самого магнитофона. Поставка на рынок накопителей на МОД началась с 1987 года. О возможностях этих устройств можно судить по характеристикам модели JY–500 фирмы Sharp стоимостью 1600000 иен: поверхностная плотность магнито-оптического диска диаметром 130 мм – 62 Мбит/см^2,шаг дорожек – 1,6 мкм, длина дорожки, занимаемая битом – 1 мкм. Емкость диска составляет 422 Мбайта, время доступа – 0,2 с. Масса накопителя – около 9 кг, габариты – 201x322x131 мм.

ЦИФРОВЫЕ ВИДЕОМАГНИТОФОНЫ

Следующим этапом в развитии цифровой БРЭА будет, без сомнения, появление на рынке бытовых цифровых видеомагнитофонов, обладающих всеми теми преимуществами перед аналоговыми видеомагнитофонами, которые дает цифровая магнитная запись. В профессиональной сфере получили распространение цифровые видеомагнитофоны формата D–1, стандарт на который уже принят. В этих магнитофонах используется магнитная лента шириной 19 мм и наклонно-строчная запись. Использование цифровых видеомагнитофонов позволяет производить многочисленные перезаписи фрагментов без ухудшения качества при монтаже программы, осуществлять преобразование программы, записанной в одном стандарте цветного телевидения, в другой (без ухудшения качества изображения). Расход ленты в этих магнитофонах не больше, чем у видеомагнитофонов формата U-matic, работающих на ленте шириной 19 мм.

Развитие бытовых цифровых видеомагнитофонов (ЦВМ) сдерживается отсутствием стандарта на бытовую цифровую видеозапись и высокой сложностью реализации. Тем не менее, уже появились опытные образцы данных видеомагнитофонов, использующих ленту шириной 12,7 и 8 мм.

Основная проблема, возникающая при записи широкополосного видеосигнала на ленту, состоит в необходимости записи цифрового потока с высокой скоростью передачи данных – до 216 Мбит/с (в формате D–1). Для записи такого потока по одному каналу необходима полоса частот записи до 30 МГц, что требует высокой относительной скорости головки, а это приводит к большому расходу ленты. В формате D–1 скорость передачи данных цифрового потока снижается путем записи по отдельным каналам сигналов яркости и цветоразностных сигналов (так называемая компонентная запись), что требует усложнения блока головок.

В бытовых ЦВМ интенсивность цифрового потока данных снижается путем применения специальных методов обработки сигналов, основанных на психофизиологических характеристиках восприятия изображения человеком и достаточно высокой корреляции сигнала изображения. Но любое понижение исходной скорости цифрового потока чревато опасностью увеличения размножения ошибок, что требует добавления избыточных данных. Пример оптимального применения техники понижения исходной интенсивности цифрового потока – опытный образец ЦВМ фирмы Mathsushita El., где скорость передачи потока понижается со 115 до 32 Мбит/с с минимальным искажением качества изображения. Сообщение о разработке и испытании такого видеомагнитофона появилось в 1987 году. В этом видеомагнитофоне применяется металлическая лента шириной 12,7 мм в кассете формата VHS. Время записи при толщине ленты 10 мкм составляет 12 часов. Этот ЦВМ обладает большей, чем у R-DAT, поверхностной плотностью записи – 27,9 Кбит/мм^2. Линейная плотность записи достигает 2,8 Кбит/мм. Ширина дорожки

записи – 9,7 мкм. Минимальная длина волны – 0,57 мкм. Основные характеристики этого видеомагнитофона следующие:

– входной видеосигнал – по стандарту NTSC(США, Япония);

– частота дискретизации – 14,3 МГц;

– разрядность АЦП – 8;

– система понижения интенсивности цифрового потока – субдискретизация преобразование Адамара, векторное квантование;

– скорость передачи записываемого сигнала – 32 Мбит/с;

– количество головок – 2 кан. x 2;

– материал головки – аморфный металл;

– скорость ленты – 1,1 см/с;

– относительная скорость – 5,8 м/с;

– ширина дорожки – 9,7 мкм;

– время записи – 12 часов;

– канальный код – модифицированный 8–10;

– код системы коррекции ошибок – двойной код Рида-Соломона;

– тип ленты – с осажденным металлическим рабочим слоем шириной 12,7 мм.

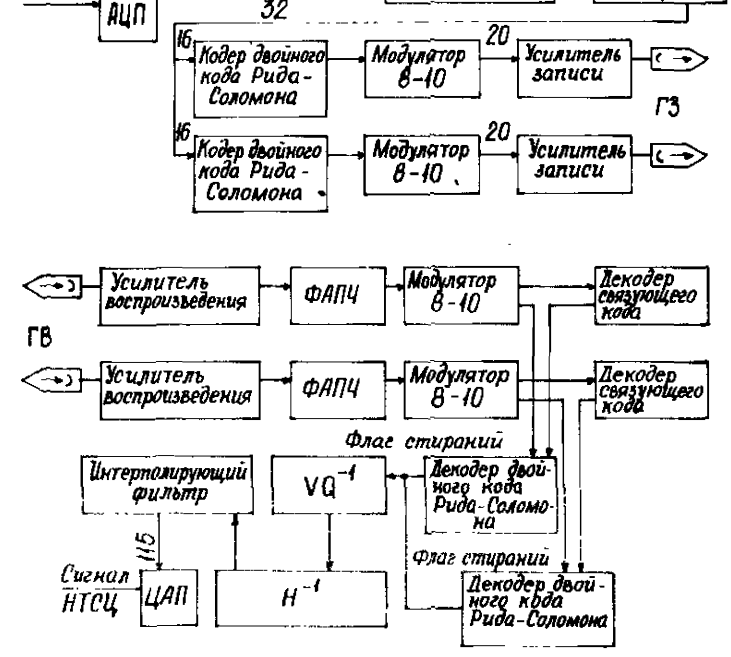


Рис.101. Структурная схема цифрового видеомагнитофона

Данный видеомагнитофон был разработан для системы цветного телевидения NTSC, действующей в США и Японии. Особенность его – применение двухканальных головок вместо одноканальных, что увеличивает число одновременно записываемых дорожек до двух и во столько же раз позволяет понизить скорости цифровых потоков в каналах записи. Структурная схема цифрового видеомагнитофона приведена на рис.101. Входной видеосигнал поступает на вход АЦП и преобразуется с частотой четвертой гармоники поднесущей цветности – 14,3 МГц. Квантование – 8-разрядное, что обеспечивает хорошее качество изображения. На выходе АЦП скорость цифрового потока составляет 115 Мбит/с. На первом этапе понижения скорости передачи данных используется метод "междупольной" субдискретизации, понижающей интенсивность потока до 57 Мбит/с. На втором этапе используется двумерное преобразование Адамара (используется матрица в 4 элемента разложения на две линии) и векторное квантование. Векторный квантователь кодирует последовательности данных после преобразования Адамара.

Эти операции приводят к тому, что эквивалентное число разрядов квантования на отсчет уменьшается с 8 до 4,5. Физически этот процесс можно представить следующим образом: для неискаженной передачи монотонных участков изображения требуется меньшее число отсчетов ИКМ-сигнала изображения, чем для участков изображения с резко меняющимся характером, имеющих мелкие детали и т.п. После второго этапа преобразования скорость потока понижается до 32 Мбит/с. Далее цифровой сигнал разделяется на два потока, каждый с интенсивностью по 16 Мбит/с, обрабатываемых двумя каналами записи видеомагнитофона. Сигналы кодируются, модулируются с помощью модифицированного канального кода *8–10* и одновременно записываются на ленте. После модулятора скорость каждого потока возрастает до 20 Мбит/с.

При воспроизведении двумя каналами осуществляется восстановление цифровых сигналов, демодуляция, обнаружение и исправление ошибок.

Для увеличения исправляющей способности помехоустойчивого кода используется способность канального кода 8–10 к обнаружению ошибок. При обнаружении комбинации, отсутствующей в кодовой таблице кода 8–10, демодулятор выдает флаг стирания, применяемый для идентификации ошибочного байта в декодере кода Рида-Соломона. Для обнаружения ошибки используется также связующий код, имеющий символы четности по горизонтальным и вертикальным направлениям таблицы данных. Неисправимые ошибки маскируются с помощью интерполяции. Далее осуществляются обратные преобразования, увеличивающие после интерполирующего фильтра скорость передачи данных до исходного значения – 115 Мбит/с. Восстановление аналогового сигнала *производится с помощью* ЦАП.

При оптимизации характеристик канала магнитной записи, выполнении головок из аморфного металла и ленты с осажденным рабочим слоем (тонкопленочные носители) вероятность появления ошибочных

символов при воспроизведении составляет 10^{-4}. Возможности системы коррекции с запасом покрывают эту величину.

В целом отмечается высокое качество изображения в таком видеомагнитофоне и высокая эффективность векторного квантования для предотвращения искажений изображения.

Степень интеграции ЦВМ более высокая, чем у R-DAT-магнитофонов. Поэтому для организации выпуска такой продукции требуется внедрение всех новейших достижений полупроводниковой технологии. Лента с осажденным в вакууме рабочим слоем пока значительно дороже металлопорошковых лент. Снижение стоимости таких лент, которые с успехом могут использоваться и для цифровых звуковых магнитофонов, связано также с совершенствованием технологии.

По некоторым прогнозам, широкое внедрение ЦВМ должно произойти в середине 90-х годов. Распространение ЦВМ может сдерживаться только начавшимся производством высококачественных аналоговых видеомагнитофонов новых форматов S–VHS и ED–Beta, обеспечивающих разрешение в 420 и 500 линий соответственно. К тому же, переход на цифровую видеозапись связан с заменой огромного парка аналоговых записей на видеокассетах (в основном, формата VHS). Надо отметить, что формат S–VHS имеет частичную совместимость с форматом VHS. Это позволяет воспроизводить записи, выполненные в формате VHS, на новых видеомагнитофонах формата S–VHS.

ЦИФРОВОЙ РАДИОКОМПЛЕКС

Появление высококачественных звуковых источников послужило толчком к совершенствованию всех звеньев звуковоспроизводящего комплекса. Искажения и шумы, вносимые усилительной аппаратурой и незаметные при использовании аналоговых источников звука, стали весьма ощутимы при использовании цифровых. Резко возросли требования к качеству акустических систем. В наметившемся развитии усилительно-акустической аппаратуры можно выделить два пути.

Первый заключается в дальнейшем совершенствовании аналоговой аппаратуры: в разработке новых схемных решений, в применении высококачественных материалов и электронных компонентов, в использовании новых конструктивных решений.

Второй – в дальнейшем внедрении цифровых методов обработки сигналов, в том числе для замены оставшихся аналоговых звеньев сверхвысококачественного тракта звуковоспроизведения. При появлении допустимых по стоимости цифровых акустических систем аналоговая обработка сигнала в комплексе аппаратуры может быть исключена.

На рис.102 изображена структурная схема цифрового радиокомплекса. Цифровой предусилитель обеспечивает необходимую коммутацию и преобразование сигналов источников. Для совмещения отдельных частей комплекса друг с другом структура цифрового сигнала, который используется при связи различных блоков между собой, стандартизирована.

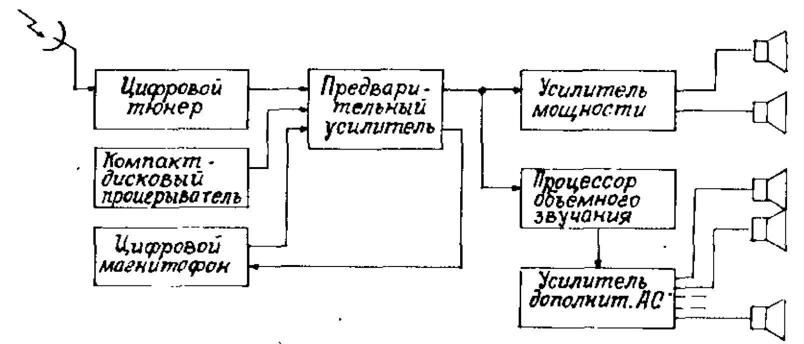


Рис.102. Структурная схема цифрового радиокомплекса

Необходимо отметить, что в будущем чисто звуковые комплексы, по-видимому, уступят место видеозвуковым комплексам. Такая тенденция уже наметилась, к тому же все перечисленные цифровые источники звука обладают потенциальной возможностью вывода на экран изображений и графической информации. При использовании вместо обычного проигрывателя CD комбинированного, позволяющего воспроизводить видеозвуковые диски и видеодиски LV, появляется возможность просмотра видеопрограмм с цифровым звуковым сопровождением высокого качества. Тюнер непосредственного спутникового вещания кроме чисто звуковых программ позволяет осуществлять и прием телевизионных программ, причем звуковое сопровождение также передается в цифровой форме. В связи с этим радиокомплекс дополняется видеомонитором, а предварительный усилитель приобретает набор видеовходов и выход для подключения видеомонитора.

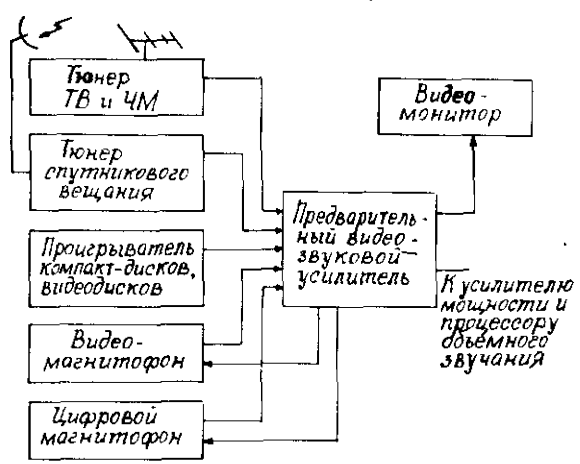


Рис. 103. Видеозвуковой радиокомплекс

На рис.103 изображена структурная схема видеозвукового комплекса. В отношении звукового сопровождения такой комплекс пока не является полностью цифровым. Аналоговые источники звука – это тюнер, принимающий обычные телевизионные программы и программы ЧМ-радиовещания, и видеомагнитофон. Необходимо отметить высокое качество звучания современных видеомагнитофонов, использующих ЧМ-запись звука (динамический диапазон – не менее 80 дБ, коэффициент нелинейных искажений – 0,03%). Будущий источник "цифрового" звука – звуковое сопровождение системы телевидения высокой четкости. В отличие от традиционного такое телевидение имеет 1125 строк и соотношение сторон экрана 5:3, что соответствует широкоформатному кино. В Японии передачи по такой системе телевидения начнутся в 1990 году, а к 2000 году Япония планирует полностью перейти на новую систему телевидения. Звук предполагается транслировать в цифровой форме, причем планируется передача 4-канального звукового сопровождения. Увеличение числа каналов связано с необходимостью обеспечения согласования распределения мнимых источников звукового поля с изображением на экране. В США существует проект использования трехканального звукового сопровождения для системы телевидения высокой четкости.

Кроме тенденции создания видеозвуковых комплексов существует тенденция к "компьютеризации" бытовых радиокомплексов, где все управление будет осуществляться с помощью персонального компьютера. Существует также ряд других проектов, воплощение которых возможно уже в ближайшее десятилетие.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Draft IEC Publication:** Digital audio recording and reproducing. System on magnetic tape for domestic use.– проект стандарта R-DAT, документ 60A (Япония), 38–1, 38–2. – 100 p.
2. **Nakajima N., Kosaka M.** The DAT Conference: its activities and results – invited.– ICCE 1986/Wednesday, June 4, 1986/Lasalle II/WAM 3.1. – P. 42–43.
3. **A Digital Audio Tape Primer.**– JEI, June, 1987/Supplement/. – 30 p.
4. **Dar Peter A. and Katsumi R.** Rotation Digital Audio Tape (R-DAT): A Format Overview//SMPTE Journal. October, 1987. – P. 943–948.
5. **Arai T, Noguchi T.** Digital signal processing technology of R-DAT//IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1986. V. CE–32. No.3.–P. 416–424.
6. **Ohtake N., Isshiki M., Kotoh T.** Magnetic recording characteristics of R-DAT// IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1986. V. CE–32. No. 4.– P. 707–712.
7. **Watkinson J.** Inside R-DAT//Hi-Fi News & record review. May, 1987. – P. 27–31.
8. **Watkinson J.** Inside R-DAT//Hi-Fi News & record review. June, 1987.– P. 35–37.
9. **Watkinson J.** Inside R-DAT//Hi-Fi News & record review.July, 1987. – P. 31–33.
10. **Watkinson J.** Inside R-DAT//Hi-Fi News & record review. August, 1987. – P. 29–31.

11. **Fukuda S., Kojima Y., Shimpuku Y., Odaka K.** 8/10 Modulation codes for digital magnetic recording//IEEE Transation on magnetics. 1986. V. MAG–22. No. 5. – P. 1194–1196.
12. **Hitomi A., Tari T.** Servo Technology of R-DAT//IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1986. V. CE–32. No. 3. – P. 401–413.
13. **Odaka K., Nagaki T., Horikowa N.** Format of pre-recorded R-DAT and rezults of high speed dublicacion – invited//IEEE 1986/Wednesday, June 4, 1986/Lasalle II/ WAM 3.5 – P. 50–51.
14. **Kaneko Koji, Sugino Yasuyuki, Hiran Yoshiaki, Takahiko Suezawa.** Development of Mechanism of Digital Audio Tape Recorder//Sharp Tech. J. 1987. No. 38. – P. 66–71 (на яп.).
15. **Watkinson J.** Rotary Head Digital Audio Tape//IBE. September, 1987.– P. 63–70.
16. **Ozaki S., Yasuda T.** JVC DAT Tape Makes a Difference//JEI. May, 1987. – P. 38–39.
17. **Nikei N.** Metal Tape for 8 mm and DAT//JEI. April, 1987. – P. 22–24.
18. **Акаси Г.** Обзор развития магнитной ленты//Scientific Publications of the Photo Fuji Film Co., Ltd, 29, 1984.– P. 75–79 (перевод И–38408).
19. **Джефферс Ф.** Магнитные головки для записи информации с высокой плотностью//ТИИЭР. 1986. № 11. – С. 78–97.
20. **Iso Y., Arai T., Shibuya T., Noguchi T.,Okamoto H.** 16-bit A/D converter and D/A converter for digital audio//IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1986. V. CE–32. No. 4. P. 734–742.
21. **Пат.** 0196216 ЕПВ, Int. Cl.: G11B 20/10. Apparatus for reproducing digital signals.
22. **Пат.** 0197782 ЕПВ, Int. Cl.: G11B 20/10. Apparatus for reproducing digital signals.
23. **Пат.** 4676453 США, Int. Cl.: G11B 23/087. Magnetic tape cassete.
24. **Пат.** 0171266 ЕПВ, Int. Cl.: G11B 5/588. Recording digital information signals.
25. **Adachi T., Taki H., Arai K.** A Fast random accessing scheme for R-DAT//IEEE Transactions on Consumer Electronics. 1987. V. CE–33, No. 3.– P. 275–285.
26. **Digital Audio:** Past, Present, and Future//JEI. August,1988.–P.28–36,70.
27. **At last** – DAT Profile of New Faces//JEI. March, 1987. – P. 30–31.
28. **DAT-Commercialization** and Future Prospect//JEI. March,1987. –P.50–51.
29. **Consumer** Electronics//IEEE Spectrum. January, 1987. – P. 56–58.
30. **Onkyo Introduces** Optocoupling in DAT Recorders//JEI. August, 1987. – P. 48.
31. **Mitsumi Components.** R-DAT, 8 mm – VTR Components.– Рекламный проспект. 1988.
32. **Sony** video/audio/magneric/precision devices. – Каталог изделий фирмы Sony. 1988.
33. **Sharp.** DAT Memory Drive RX–U110. – Рекламный проспект. 1988.
34. **Sharp.** JY–500. – Рекламный проспект. 1988.
35. **JVC.** Digital Acoustics Processor– Рекламный проспект. 1988.
36. **Muto Kenji.** In Search of Sound Excellence//JEI. January, 1987.
37. **IEC** document 84 (secretariat) 50: Draft – Digital Audio Interface. – 27 p. (проект стандарта).

38. **Ken C. Pohlmann.** The Compact Disc Formats: Technology and Applications// AES Journal. 1988. No. 4. P. 47–55.

39. **Yamamitsu C., Ide A., Iketani A., Juri T.** An Experimental digital VTR capable of 12-hour recording//ICCE 87/Friday, June 5, 1987/EXECUTIVE FORUM/FAM 17.5 – P. 228–229.

40. **Накадзима X., Огава X.** Цифровые грампластинки/Пер. с яп. под ред. В.Г.Королькова. – М.: Радио и связь, 1988. – 168 с.

41. **Имамура Н.** Технология магнито-оптической записи//Тэрэбидзен гаккайси. 1985. № 4. С. 365–373 (перевод Д–1518/3).

42. **Чарльз Л. Коэн.** Бытовая аппаратура для записи на компакт-диски//Электроника (США). 1984. № 21. – С. 5–6.

43. **Дж.Гош.** Стираемый компакт-диск фирмы Thomson//Электроника (США). 1988. № 6. – С. 9–10.

44. **Цифровые** магнитофоны//Televis. Techn. and Electron. 1987.V. 35. No. 4. – P. 109–117 (яп.).

45. **Щербина В.И.** Цифровые магнитофоны.–М.: Радио и связь, 1986.–55 с.

46. **Иванов Р., Лауд Т.,Штутман Л.,Черноиванов В.** Цифровая оптическая звукозапись//Радио. 1987. № 11. С. 17–20.

47. **Маркелов В.А., Петров А.М., Тейерман В.А., Тимочкин А.Б.** Бесконтактные двигатели постоянного тока для звуко- и видеоаппаратуры. – Обзоры по электронной технике. Серия 6. "Материалы". 1987. Вып. 5. – 84 с.

48. **Дворецкий И.М., Дриацкий И.Н.** Цифровая передача сигналов звукового вещания. – М.: Радио и связь, 1987. – 192 с.

49. **Блох Э.Л., Зяблов В.В.** Обобщенные каскадные коды. – М.: Связь, 1976. – 240 с.

50. **Питерсон У.** Коды, исправляющие ошибки: Пер. с англ. – М.: Мир, 1964. – 338 с.

51. **Берлекэмп Э.** Алгебраическая теория кодирования: Пер. с англ.– М.: Мир, 1971.– 477 с.

52. **Толлмин Г.** Является ли звуковоспроизведение естественным?//Funk-Technik, 1984. № 2.– С. 58–60 (перевод КЛ–87580).

53. **Пат.** 4641208 США, Int. Cl.: G11B 27/28. Recording/reproducing apparatus.

54. **Пат.** 0178589 ЕПВ, Int. Cl.: G11B 20/14. Method and apparatus for recording PCM signal.

55. **Colloms M.** Hands – on DAT a first riview//Hi-Fi News & Record Review. July, 1987.– P. 43–55.

СОДЕРЖАНИЕ